

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Marko Živec

AVTOMATSKA REGULACIJA LAKIRNO SUŠILNE KOMORE

DIPLOMSKO DELO NA UNIVERZITETNEM ŠTUDIJU

Ljubljana, 2016



UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Marko Živec

AVTOMATSKA REGULACIJA LAKIRNO SUŠILNE KOMORE

DIPLOMSKO DELO NA UNIVERZITETNEM ŠTUDIJU

Mentor izr. prof. dr. Uroš Lotrič

Ljubljana, 2016



Rezultati diplomskega dela so intelektualna lastnina avtorja. Za objavlanje ali izkoriščanje rezultatov diplomskega dela je potrebno pisno soglasje avtorja, Fakultete za računalništvo in informatiko ter mentorja.



Fakulteta za računalništvo in informatiko izdaja naslednjo nalogo:

Tematika naloge:

Za zagotavljanje boljše kvalitete površinskih nanosov na izdelke, je potrebno v lakirno sušilni komori zagotoviti kar se da konstante razmere. Pri tem je v veliko pomoč avtomatsko vodenje procesa, ki pomaga tudi pri zmanjševanju porabe energentov in k izboljšanju delovnega okolja. Za lakirno sušilno komoro, izdelano v samogradnji, vzpostavite krmilni sistem in z njim avtomatizirajte nadzor pretoka zraka, nadtlaka in temperature v komori. Za zaprto-zančno regulacijo sistema izberite ustrezen regulator in s testiranjem na realnem sistemu preverite, da je njegovo delovanje ustrezno.





## **Izjava o avtorstvu diplomskega dela**

Spodaj podpisani Marko Živec, sem avtor diplomskega dela z naslovom

AVTOMATSKA REGULACIJA LAKIRNO SUŠILNE KOMORE.

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem diplomsko delo izdelal samostojno pod mentorstvom izr. prof. dr. Uroša Lotriča;
- so elektronska oblika diplomskega dela, naslov (slov., angl.), povzetek (slov., angl.) ter ključne besede (slov., angl.) identični s tiskano obliko diplomskega dela;
- soglašam z javno objavo elektronske oblike dela v zbirki »Dela FRI«.

V Ljubljani, dne 25. 6. 2016

Podpis avtorja:



## **Zahvala**

Zahvaljujem se mentorju izr. prof. dr. Urošu Lotriču za pomoč, strokovnost in usmeritve pri izdelavi diplomskega dela.

Zahvaljujem se tudi družini za vso podporo in spodbudo v času študija.



# Kazalo

Povzetek

Abstract

1.	Uvod .....	1
2.	Vodenje sistemov .....	3
2.1.	Dvotočkovna regulacija .....	3
2.2.	Regulacija PID .....	4
3.	Definicija obravnavanega primera.....	7
3.1.	Klasifikacija lakirnih komor .....	7
3.2.	Tehnološke karakteristike lakirno-sušilnih komor.....	8
3.2.1.	Oblika delovne komore .....	8
3.2.2.	Krmilni elementi.....	9
3.2.3.	Temperatura.....	10
3.2.4.	Mehanska sestava lakirno-sušilne komore .....	10
3.2.5.	Postopek lakiranja .....	11
3.2.6.	Čiščenje zraka.....	12
3.3.	Izbira krmilnih komponent .....	12
4.	Krmilni program .....	21
4.1.	Grafični vmesnik.....	21
4.2.	Osnovni algoritem.....	23
4.3.	Glajenje vhodnih signalov .....	24
4.4.	Regulacija peči.....	25
4.5.	Regulacija pretoka in nadtlaka.....	26
4.5.1.	Regulacija PID.....	33
5.	Zaključek .....	39
	Literatura .....	41



## **Povzetek**

V diplomskem delu je predstavljena rešitev za avtomatsko regulacijo procesov v lakirno-sušilni komori. Ta mora zagotavljati čim bolj konstantne razmere, ki omogočajo boljšo kakovost površinskih nanosov na izdelke, prav tako pa prispeva k zmanjšanju porabe energentov in k izboljšanju delovnega okolja. Opisani so fizični elementi, potrebni za krmiljenje in regulacijo, programski del, ki vključuje algoritem za regulacijo temperature, nadtlača v komori in pretoka zraka, ter uporabniški vmesnik. Opisana sta dvotočkovna regulacija in regulacija PID, ki sta v regulacijski proces implementirani in v nalogi primerjani. Krmilni program je napisan v programskem jeziku C# in teče na računalniku PC. Kot uporabniška vhodno/izhodna naprava je uporabljen zaslon na dotik. Za dan sistem se je dvotočkovna regulacija izkazala za pomanjkljivo, saj z njo ni bila zagotovljena stabilnost sistema. Regulacija PID je bila v testiranjih zmeraj zanesljiva, prav tako pa je z ustrezno nastavljenimi parametri dosegla dober odziv sistema na zahtevane spremembe delovanja in motnje.

Ključne besede: lakirno-sušilna komora, dvotočkovna regulacija, regulacija PID





## **Abstract**

The thesis presents a solution for automatic control of a paint spray booth with integrated dryer. The conditions in the booth must be as constant as possible to assure better quality of surface coating applied on a particular object, while also lowering the consumption of energy sources and improving the working environment. The thesis includes descriptions of physical elements used for control and regulation, the software solution, which includes algorithms for the regulation of the temperature, overpressure in the booth and airflow, as well as the user interface. Also included is the description of on-off and PID closed-loop control systems, which were implemented and compared. The control program is written in C# and runs on a PC. A touch screen display is used as the user input output device. While the on-off regulation proved to be unstable in the given system, the PID regulator was very reliable during the testing period with satisfactory results.

Key words: paint spray booth with integrated dryer, on-off control system, PID closed-loop control systems



## 1. Uvod

S površinskimi premazi končnih izdelkov dosegamo boljšo protikorozijsko in mehansko zaščito izdelkov ter boljši estetski videz le-teh. Eden od mnogih, v te namene uporabljanih postopkov, je nanos zaščitnih premazov s pršenjem.

Za čim učinkovitejšo izvedbo postopka ob hkratni optimalni končni kakovosti izdelka, porabi energentov in materialov ter ob strogem upoštevanju zdravstvenih, ekoloških, varnostnih in naravovarstvenih standardov in predpisov, se proces pršenja izvaja v posebej v te namene izdelanih komorah. Komore, v kateri s postopkom pršenja nanašamo barvne lake, imenujemo lakirne komore. Nanašanje se izvaja ročno ali strojno. V vseh primerih pa mora lakirna komora dosegati naslednje tehnološke zahteve:

- enakomeren in zadosten pretok zraka skozi komoro zaradi tehnoloških, varnostnih, ekoloških in zdravstvenih razlogov;
- zagotavljanje minimalnega nadtlaka med celotnim postopkom obdelave, za zagotavljanje protiprašne atmosfere;
- stabilno ogrevanje vstopnega zraka, zaradi zdravstvenih in tehnoloških zahtev.

Poleg zunanjih motenj, ki vplivajo na dokaj natančne tehnološke zahteve, vse tri veličine v procesu vplivajo druga na drugo. Med zunanje vplive prištevamo predvsem spremembe v temperaturi zunanjega zraka ter stalnemu povečevanju upora v obveznih vstopnih in izstopnih zračnih filtrih.

V lakirni komori reguliramo tri veličine: temperaturo, nadtlak in pretok zraka skozi komoro. Temperaturo reguliramo z vklapljanjem in izklapljanjem peči, tlak v komori in pretok zraka pa s frekvenčno regulacijo števila obratov na pogonih zračnih turbin, ki sta vgrajeni v dovodnem in odvodnem zračnem kanalu.

V naslednjem poglavju je opisana teorija vodenja sistemov, različni sistemi vodenja in regulacija PID. Tretje poglavje opisuje obravnavan problem. Vključuje opis lakirne komore, uporabljene elemente in postopek lakiranja. V četrtem poglavju je opisana programska rešitev. Vključuje pet podpoglavij. Prvo opisuje grafični vmesnik. V drugem podpoglavju je razloženo osnovno delovanje programa. Tretje podpoglavje opisuje težavo z glajenjem vhodnih signalov in njeno rešitev. Četrto podpoglavje je namenjeno razlagi regulacije peči, peto pa vključuje dva izvedena načina regulacije. V zaključku je podana primerjava teh dveh načinov in pomembnejše ugotovitve.



## 2. Vodenje sistemov

Vodenje je proces, s katerim vplivamo na delovanje sistema z namenom, da dosežemo zastavljeni cilj oziroma želeno delovanje [1]. S sistemi vodenja želimo doseči želeno obnašanje osnovnega sistema. Razlikujemo med zveznim, diskretnim-logičnim in hibridnim vodenjem.

Pri zveznem vodenju, ki mu rečemo tudi regulacija, je potrebno doseči želeni potek fizikalnih veličin (na primer temperatura, tlak, pomik). Značilno je predvsem za procesno industrijo. Običajno se vodenje izvede s pomočjo industrijskih regulatorjev ali procesnih računalnikov.

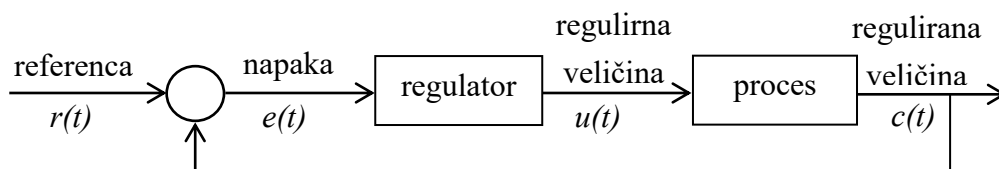
Pri diskretnem vodenju govorimo o želenem zaporedju diskretnih stanj (na primer učinkovitim razvrščanjem opravil, sestavljanje). Vodenje običajno izvedemo s programirljivimi logičnimi krmilniki. To vodenje je značilno predvsem pri sestavljanju izdelkov.

Hibridno vodenje je kombinacija obeh, saj želimo doseči nek potek fizikalnih veličin, hkrati pa tudi slediti želenemu zaporedju diskretnih stanj.

Pogosta zahteva je, da se referenčna ali želena veličina  $r(t)$  in regulirana ali krmiljena veličina  $c(t)$  čim bolj ujemata, ne glede na motnje, ki vplivajo na sistem vodenja.

Ločimo kompenzacijsko vodenje, odprtozančni sistem vodenja in zaprtozančni sistem vodenja. Omejili se bomo na zaprtozančne sisteme vodenja.

Zaprtozančni sistem vodenja ali regulacijski sistem, ki ga prikazuje slika 1, vsebuje povratno zanko, ki nam da povratno informacijo o vplivu spremembe regulirne veličine na delovanje sistema. Tako dobimo bolj točno in prilagodljivo delovanje. Regulator regulirano veličino  $c(t)$  primerja z referenco  $r(t)$ , na osnovi napake  $e(t)$  pa regulirno veličino  $u(t)$  poskuša spremeniti tako, da zmanjša napako.



Slika 1: Bločni diagram zaprtozančnega regulacijskega sistema

### 2.1. Dvotočkovna regulacija

Dvotočkovna regulacija je preprost zaprtozančni sistem regulacije. Določeno imamo srednjo vrednost, ter parameter, ki določa pozitivno in negativno odstopanje od te vrednosti. Tako dobimo dve točki, ki predstavljata vrednosti, pri katerih na primer vklopimo ali izklopimo peč

oziroma povečamo ali zmanjšamo regulirno veličino. Če je izmerjena vrednost med tema dvema točkama, regulirna veličina ostane enaka. Preprost primer tega načina regulacije je termostat, ki vklopi peč, če temperatura pade pod nastavljeno vrednost, in jo izklopi, ko temperatura preseže nastavljeno zgornjo mejo.

Ta način regulacije je preprost in cenovno ugoden ter v določenih primerih daje zadovoljive rezultate. Težava je v tem, da zaradi konstantne velikosti spremembe regulirne veličine ali samo dveh stanj (vklop in izklop) prihaja do nihanj, saj ne moremo natančneje določati regulirne veličine. Tako recimo v drugem opisanem primeru regulator ne odreagira na dogajanje, ko je pretok znotraj mejnih vrednosti, čeprav se konstantno povečuje in je razvidno, da bo iz tega območja izstopil. Prav tako sistem potrebuje dlje, da se ustali.

## 2.2. Regulacija PID

Proporcionalno – integrirno – diferencirna regulacija ali regulacija PID je v industriji najpogostejše uporabljen algoritem. Sestavljena je iz treh osnovnih delov: proporcionalnega, integrirnega in diferencirnega, ki ob ustrezno nastavljenih parametrih dajo zadovoljiv rezultat. Regulator sproti računa napako kot razliko med regulirano veličino in referenco. To razliko poskuša s časom minimizirati s prilagajanjem regulirne veličine  $u(t)$ :

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad ,$$

kjer  $K_P$ ,  $K_I$  in  $K_D$  predstavljajo koeficiente oziroma ojačenja proporcionalnega (P), integrirnega (I) in diferencirnega (D) dela regulacije.

Proporcionalni člen vrne regulirno veličino  $u(t)$ , ki je premosorazmerna z napako. Proporcionalni odziv lahko prilagodimo z množenjem napake s konstanto  $K_P$  (ojačenje regulatorja P). Za regulator P velja enačba:

$$u(t) = K_P e(t) \quad .$$

Visoka vrednost konstante  $K_P$  povzroči veliko spremembo na izhodu pri dani spremembi napake. Če je vrednost konstante previsoka, sistem lahko postane nestabilen. Nasprotno lahko nizka vrednost konstante povzroči slabšo odzivnost in manj občutljiv sistem, saj nam pri veliki napaki da majhen izhod. Če je prenizka, je odziv lahko premajhen za večje motnje. Proporcionalni člen regulacije bi v splošnem moral imeti največji vpliv na regulacijo.

Integrirni člen da izhodno vrednost, ki je premosorazmerna z velikostjo preteklih vrednosti napake in njenim trajanjem. Torej gre za vsoto napak v času, ki jo pomnožimo s konstanto  $K_I$ . Velja enačba:

$$u(t) = K_I \int e(t) dt \quad .$$

Bistvena lastnost je, da integrirni člen spreminja regulirno veličino tudi, če je trenutna napaka enaka nič, predhodne napake pa različne od nič.

Diferencirni del regulatorja nam pomaga predvidevati prihodnje vrednosti v odvisnosti od strmine grafa napake, se pravi glede na spremembo velikosti napake v času. Vpliv tega na regulacijo določa konstanta  $K_D$ , enačba člena D pa je

$$u(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad .$$

Ta člen predvidi obnašanje sistema in posledično zmanjša čas stabilizacije in izboljša stabilnost sistema. Slabost je občutljivost na motnje, saj lahko zaradi motenj sistem napačno predvidi prihodnje vrednosti. Občutljiv je predvsem na visokofrekvenčne motnje, kar lahko izboljšamo z uporabo nizkoprepustnih filtrov, ki zadušijo takšne motnje v signalu. V praksi se redko uporabljajo samostojno, v kombinaciji z regulatorji P ali PI pa izboljšajo odzivnost sistema na spremembe.

Ker regulacija PID temelji samo na izmerjenih vrednostih v procesu in ne na razumevanju samega procesa, je zelo široko uporabna. S prilagajanjem treh parametrov tega modela lahko regulator prilagodimo specifičnim zahtevam procesa:

- povečanje koeficienta  $K_P$  skrajša čas do dosežene želene vrednosti;
- s koeficientom  $K_D$  zmanjšamo prevzpon in skrajšamo čas stabilizacije sistema;
- koeficient  $K_I$  odpravlja napako v ustaljenem stanju.

Čeprav regulatorji PID omogočajo uporabo v številnih primerih in pogosto dajejo zadovoljive rezultate že z majhnimi prilagoditvami, nam v splošnem ne zagotavljajo optimalne regulacije. Osnovna težava je, da gre za regulacijo, ki temelji na povratni zanki s konstantnimi parametri. Zaradi nepoznavanja konkretnega procesa se ne more odzvati na spremembe v samem procesu (na primer, če se sistem obnaša drugače po fazi ogrevanja), lahko se pojavijo težave pri odzivu na večja nihanja v procesu. Težave nastanejo tudi pri nelinearnih sistemih. Pri ogrevanju stanovanja imamo na primer fazo ogrevanja, kjer prostor segrevamo s pomočjo grelnih teles, ter fazo hlajenja, kjer imamo pasivno hlajenje, torej se prostor sam ohlaja in ga ne hladimo aktivno. To pomeni, da se prostor segreva bistveno hitreje, kot hladi, zato moramo parametre nastaviti tako, da pride do čim manjšega prevzpona. Posledično pa je daljši tudi čas, v katerem dosežemo želeno temperaturo.





### 3. Definicija obravnavanega primera

#### 3.1. Klasifikacija lakirnih komor

Mnoge izdelke v vsakdanji rabi po končanem proizvodnem postopku proizvajalci še površinsko obdelajo zaradi:

- protikorozijske in erozijske zaščite občutljivih materialov;
- estetskega videza končnega izdelka.

Zelo pogost način zaščite je nanos površinskih premazov. Eden od mnogih postopkov za nanašanje zaščitnih premazov je pršenje sredstev v tekoči obliki skozi šobe z dodatkom komprimiranega zraka pod tlakom do 1000 kPa (aerosoli). Temu postopku vedno sledi faza sušenja premaza, s katero izločimo iz nanosa topilo in povzročimo strjevanje premaza. Sredstva, ki jih pri tem uporabljamo so, laki, smole, plastični premazi in podobno. Za katero vrsto takega nanosa gre, je odvisno od namena končnega učinka nanosa. Od vrste nanosa pa je odvisen tudi izbran tehnološki postopek.

V vsakem primeru je prva faza (pršenje), zaradi relativno velike emisije premazov v okolico, ekološko obremenjujoča za ozračje in vodotoke ter zdravju škodljiva, druga faza (sušenje), kjer želimo doseči končni učinek v najkrajšem možnem času pod optimalnimi pogoji (ventilacija in segrevanje okolice končnega izdelka), pa je zelo energijsko potratna. Da lahko v postopku nanosa premazov s pršenjem dosežemo optimalne in ekonomične razmere, je treba na delovnem mestu zagotoviti dokaj natančne pretočne, tlačne ter temperaturne in seveda varnostne, zdravstvene ter naravovarstvene pogoje [2, 3, 4].

Obe zahtevi sta podvrženi tudi dokaj strogi zakonodaji, ki poleg predpisanih škodljivih emisij in porabe energije določa tudi kriterije protipožarne in protieksplzijske zaščite pri ravnanju s hlapljivimi snovmi in prašnimi delci v prisilnem pretoku zraka. Ustrezni standardi in pravilniki so navedeni v literaturi [5, 6, 7].

Za doseganje optimalnih, zdravju neškodljivih delovnih pogojev, ekološke zaščite in energijske porabe, se nanos zaščitnih sredstev s pršenjem opravlja v posebnih prostorih, ki jim v primeru, ki je obravnavan v tej nalogi (osnovno in končno lakiranje avtomobilskih delov in osebnih avtomobilov), rečemo kar lakirne komore. Izkušnje in primeri dobrih praks nakazujejo, da pravzaprav v obravnavani aplikaciji opravimo obe fazi (lakiranje in sušenje) v eni komori, ki jo zato imenujemo lakirno-sušilna komora [8, 9, 4].

### 3.2. Tehnološke karakteristike lakirno-sušilnih komor

Lakirno sušilne komore imajo dokaj standardno sestavo, ki je pogojena z vsemi že omenjenimi tehnološkimi, varnostnimi, zdravstvenimi in naravovarstvenimi standardi. Komore tako sestavljajo naslednji podsklopi:

- delovni prostor v katerega med obdelavo zrakotesno zapremo obdelovani predmet in ustrezno število delavcev; konstrukcija prostora mora biti takšna, da zagotavlja mehansko trdnost prostora, toplotno zaščito za preprečevanje dodatnih toplotnih izgub med obratovanjem in dovolj visoko zrakotesnost;
- podsklop za dovod zadostne nadzorovane količine svežega zraka iz okolice z vgrajenimi filtri;
- podsklop za odsesavanje odpadnega zraka nazaj v okolico; izstopne odprtine so običajno v rešetkastih pohodnih tleh; podsklop je prav tako opremljen s filtri;
- mehanizem za nadzorovano mešanje svežega in odpadnega zraka, ki pripomore k večji energijski ekonomičnosti celega sistema;
- grelnik vstopnega zraka z ustreznim toplotnim izmenjevalcem; grelnik za energent uporablja lahko plinsko olje ali zemeljski plin; pri uporabi zemeljskega plina so poznane izvedbe brez toplotnega izmenjevalnika;
- ustrezno nameščeni in dostopni priključki za tehnološki komprimirani zrak;
- svetlobni paneli z možnostjo segmentnega vklapljanja so namenjeni zagotavljanju čim primernejših delovnih pogojev in možnosti sprotne optičnega preverjanja kakovosti nanosa lakov.

Delovni proces v lakirno-sušilni komori zahteva zaradi varnostnih, tehnoloških, zdravstvenih in naravovarstvenih predpisov, določitev osnovnih fizikalnih parametrov, ki jih je treba upoštevati pri zasnovi in projektiranju lakirno-sušilne komore kot tudi med obratovanjem. Ker je obravnavana lakirno-sušilna komora izdelana v samogradnji, je treba te veličine pred zasnovo ustreznega krmilja vsaj okvirno preveriti. Izhajam iz geometrijskih karakteristik komore, ki so določene s potrebami in željami uporabnika.

#### 3.2.1. Oblika delovne komore

Delovni prostor obravnavane lakirno-sušilne komore je delovna komora, ki je dovolj velika, da je v njej mogoče opraviti operacije nanašanja in sušenja barve na objekt do velikosti kombiniranega zaprtega vozila. Pri tem mora delovna komora zagotavljati dovolj delovnega prostora v okolici takega objekta. Izbrana velikost prostora je s tem določena na notranje mere 6,5 m x 4 m x 2,6 m. Na poševnine ob straneh zgoraj so na dveh straneh nameščenih paneli za fluoroescenčno osvetlitev v treh stopnjah. Preostali del stropne površine v velikosti 6 m x 3 m je panel vstopnega zraka z vgrajeno mikrofiltrsko blazino. Izstopni zrak v tleh komore je izveden s pohodno industrijsko rešetko v enaki velikosti in vgrajenim filtrirnim panelom. Ena

od krajših stranic je v širini 3 m in višini 2,2 m opremljena s trokrilnimi tesnjenimi transportnimi harmonika vrati.

Sestavo prikazano na sliki Slika 2 ima tudi obravnavana komora, za katero smo izdelali ustrezno krmilje. Obravnavana lakirno-sušilna komora je nastala v samogradnji leta 1999 in ima naslednje mehanske karakteristike:

- stene izolacijskih panelov Trimo debeline 55 mm;
- fluorescentna osvetlitev v treh vertikalnih panelih levo in desno s skupno močjo 2,5 kW;
- sistem za dovod zraka:
  - turbina Marvent RVS 500/135-4, kapaciteta: 17.500 m<sup>3</sup>/h, 1450 min<sup>-1</sup>;
  - pogonski motor turbine: asinhroni 3 fazni, 3 kW, prestavno razmerje 1:2;
  - napajanje motorja z inverterjem Hitachi L100 z največjo dovoljeno frekvenco 60 Hz;
  - grelnik zraka z oljnim gorilnikom moči 180 kW ter neposrednim izmenjevalnikom zrak-zrak;
  - žepasti predfilter;
  - preklopna zračna loputa za preklap med dovodom svežega zraka (faza nanašanja laka) in zaprtim kroženjem (faza sušenja);
- sistem za odsesavanje zraka:
  - turbina Marvent RVS 500/135-4, kapaciteta: 17.500 m<sup>3</sup>/h, 1450 min<sup>-1</sup>;
  - pogonski motor turbine: asinhroni 3 fazni, 3 kW, prestavno razmerje 1:2;
  - napajanje motorja z inverterjem Hitachi L100 z največjo dovoljeno frekvenco 60 Hz;
  - žepasti predfilter;
  - preklopna zračna loputa za preklap med odvodom zraka iz komore (faza nanašanja laka) in zaprtim kroženjem (faza sušenja).

### 3.2.2. Krmilni elementi

Krmilni elementi lakirno-sušilne komore so vgrajeni na zunanje stene komore in s krmiljem povezani z oklopljenimi ozemljenimi kabli. V komoro so tako vgrajeni samo delovni segmenti krmilja in tipal. Temperaturni senzor je montiran približno v težišču tlorisne površine komore v oddaljenosti 50 cm od stropa. Merilna odprtina tlačnega senzorja je nameščena približno v središču bočne stranice komore. Na istem mestu je nameščena tudi odprtina varnostnega tlačnega senzorja. Ob vhodnih vratih je vgrajeno stikalo za izklop v sili. Ob transportnih vratih je vgrajen monitor LCD na dotik v zastekljeni omarici. Merilnik pretoka zraka je pritrjen na vstopni zračni kanal med turbino in umirjevalno vstopno komoro.

**Grelnik** se vkloplja po potrebi in ima vgrajeno zaščito proti pregretju. Pogoji za optimalno delovanje je, da je treba po vsakem vklopu držati gorilnik vklopljen dokler ne doseže delovne

temperature. V nasprotnem primeru pride do nepopolnega zgorevanja in nepotrebnega sajenja gorilnika.

**Loputi** za spremembo toka delovnega zraka iz položaja pretoka v položaj delne cirkulacije sta opremljeni s enosmernima motorjema, ki sta vezana tako, da imata definirani končni poziciji s položajno nastavljivimi mikrostikali, ki so vezana v tokokrog za samodejno menjavo smeri. Položaj za cirkulacijo (faza sušenja) je že mehansko izdelan tako, da se pri cirkulaciji porabi okrog 15 % svežega in 85 % obtočnega zraka [2, 8, 11].

**Turbini** RVS 500/135-4 za vstopni in izstopni zrak sta gnani z asinhronima trifaznima motorjema moči 3 kW, ki sta krmiljena preko frekvenčnih regulatorjev Hirtachi L100. Zaradi mehanskih omejitev vgrajenih turbin sta regulatorja omejena na največjo frekvenco 55 Hz.

**Luči** prižigamo v treh stopnjah po vzorcih, ki so definirani običajno samo v prvi fazi obdelave in so odvisni od velikosti in oblike.

### 3.2.3. Temperatura

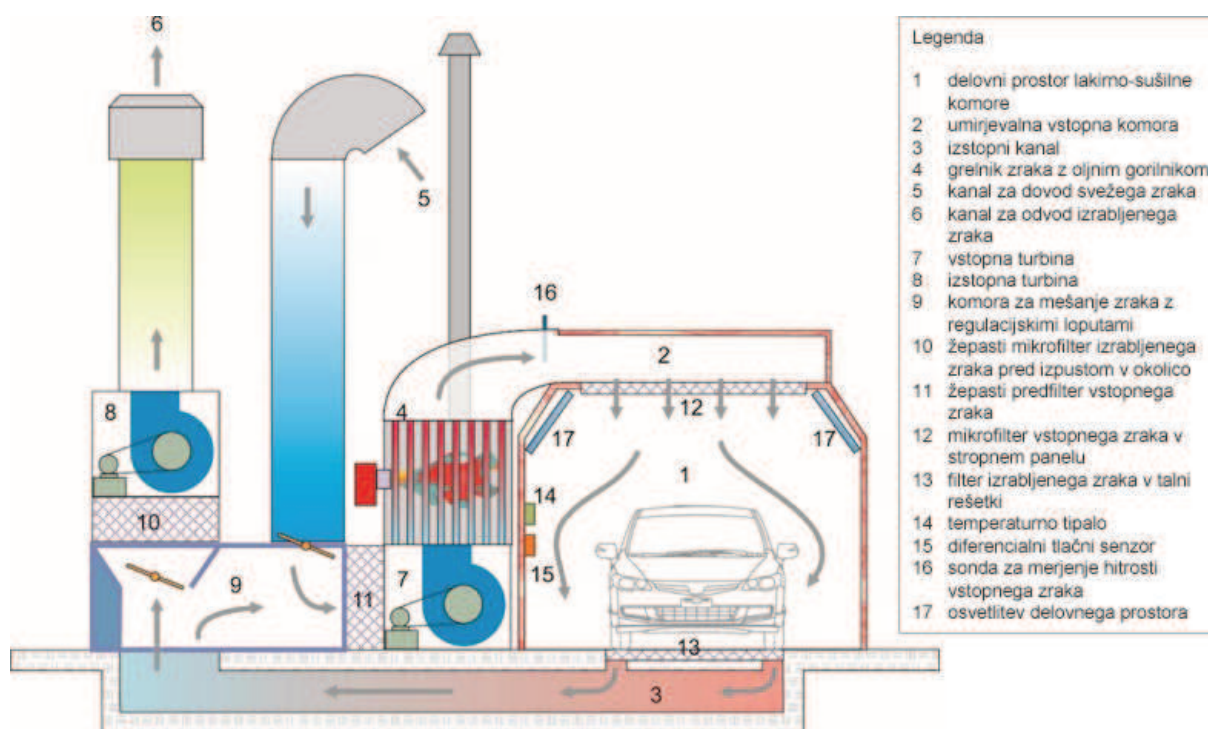
Temperaturo reguliramo z direktnim dogrevanjem vstopnega zraka. V sistem je vgrajen dvostopenjski gorilnik z naslednjimi karakteristikami: prva stopnja z močjo 120 kW se vklopi prvi dve minuti delovanja. Če v tem času še ni dosežena končna temperatura, se samodejno vključi druga stopnja z dodatno močjo 60 kW [10, 11].

Za okvirno oceno toplotnih izgub delovne komore je bil izveden kratek transmisijski izračun toplotnih izgub, iz katerega lahko sklepamo, dvojje:

- izbrana toplotna moč za gorilnik je v optimalnih mejah;
- transmisijske izgube ne predstavljajo signifikantnega vpliva na porabo dovedene energije.

### 3.2.4. Mehanska sestava lakirno-sušilne komore

Za doseganje tehnoloških, okoljevarstvenih in kakovostnih zahtev imajo lakirno-sušilne komore danes osnovno mehansko sestavo, prikazano na sliki 3.



Slika 2: Shematski prikaz zgradbe obravnavane lakirno-sušilne komore

V svetovni ponudbi obstajajo lakirno-sušilne komore za isti namen, ki so izpeljanke iz osnovne sestave. Vse izpeljane variante običajno pomenijo dodaten prispevek k energetski učinkovitosti, boljši ekološki zaščiti ali ugodnejšim delovnim pogojem.

### 3.2.5. Postopek lakiranja

Postopek sestavlja dve tehnološki fazi: faza lakiranja in faza sušenja.

#### Faza lakiranja

Ta faza je izredno občutljiva na spremembe temperature med obdelavo. Dovoljena toleranca je  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ . Zato je natančna regulacija temperature med obratovanjem komore izrednega pomena. Dane zahteve je najlažje obravnavati z regulacijo z mešanjem vstopnega in povratnega zraka, ki pa žal zaradi danih tehnoloških možnosti obravnavanega primera ni ustrezna. V danih okoliščinah je izvedljiva regulacija z direktnim krmiljenjem gorilnika ob hkratnem spreminjanju pretoka zraka v dovoljenih mejah. Priporočene temperature za fazo lakiranja so prilagojene udobju delavcev v komori in se gibljejo med  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  in  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  z odstopanji  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Mešalni loputi za zrak sta nastavljeni tako, da v komoro dovajamo samo svež zrak. Tak režim je pomemben iz varnostnega (protieksplzijska zaščita) in zdravstvenega vidika. Prevelika koncentracija hlapljivih snovi kvarno vpliva na zdravje osebja v komori. Temperaturo predpisuje proizvajalec uporabljenih lakov skupaj s priporočeno vertikalno hitrostjo zraka. V

tej fazi so obrati vhodne in izhodne turbine podobni. Razlikujejo se samo za toliko, da lahko vzdržujemo potreben nadtlak. Potreben nadtlak je relativno občutljiva veličina, saj njegova eksperimentalno dobljena vrednost znaša za prvo fazo  $0,3 \pm 0,2$  kPa. Zaradi neprestanega zamaševanja vseh filtrov v sistemu, prihaja med procesom do nenehnega spreminjanja tlačnih režimov, ki jih je treba zato neprestano nadzorovati in regulirati.

### **Faza sušenja**

V fazi sušenja v komori ni delavcev, zato so lahko temperature bistveno višje, in sicer se gibljejo med 50 °C in 80 °C. Tudi za to fazo predpisuje priporočene mejne vrednosti temperature v komori proizvajalec lakov. Z višanjem temperature in povečanjem pretoka zraka lahko tudi bistveno pospešimo proces, s čimer se skrajša čas sušenja in zmanjša nevarnost vključkov prahu v laku. Lopute so v tej fazi nastavljene tako, da zrak kroži, dovaja se le manjši odstotek svežega zraka. Zrak v izhodnem kanalu je preusmerjen nazaj preko grelnikov, vhodna turbina pa ta zrak dovaja nazaj v komoro. Zaradi tega je tudi delovni režim turbin drugačen kot v fazi lakiranja. Med tem, ko vhodna turbina deluje pri podobnih obratih kot med fazo lakiranja, pa izhodna turbina deluje z bistveno nižjimi obrati in samo preprečuje nastanek previsokega nadtlaka v komori. Zaradi zamaševanja filtrov namreč zrak ne more neovirano krožiti in izhodna turbina v bistvu samo pomaga odvajati zrak.

#### **3.2.6. Čiščenje zraka**

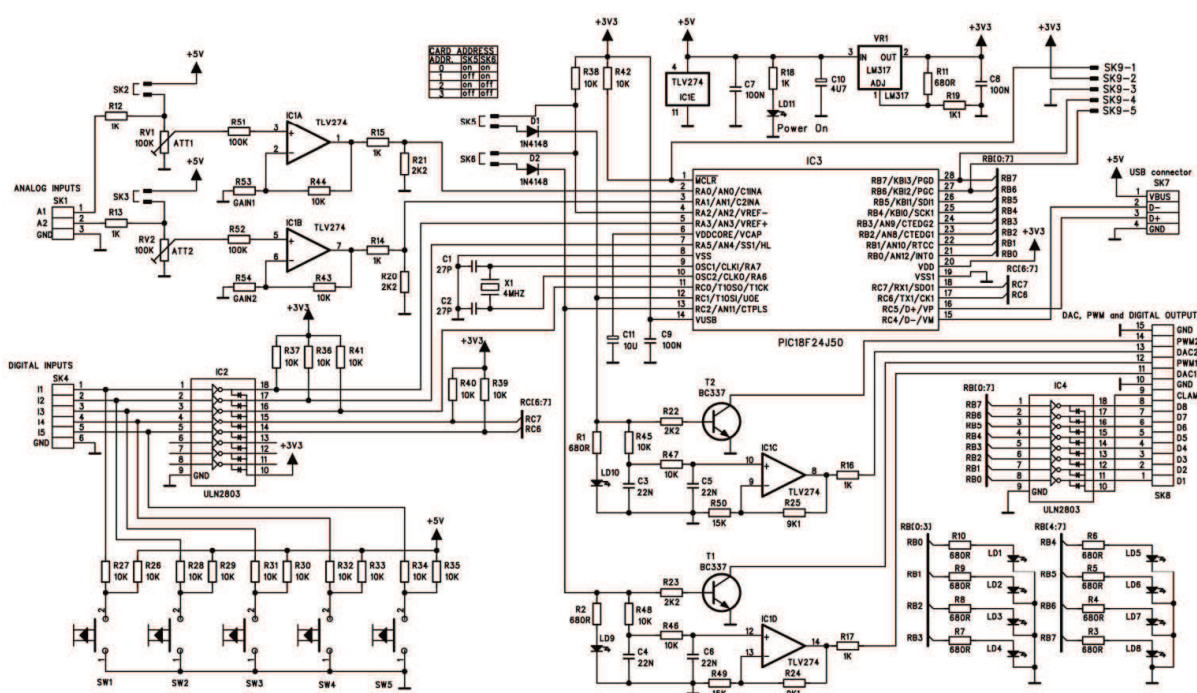
Zaradi tehnoloških in ekoloških zahtev postopka je treba tehniški zrak v postopku čistiti na vhodni in izhodni strani. Čiščenje svežega zraka poteka z dvostopenjskim filtrom. Prva stopnja je vgrajena v dovodni kanal. Ta preprečuje vnos prašnih delcev iz okoliškega zraka v delovni prostor. Drugi panelni filter je nameščen v umirjevalno vstopno komoro (plenum) vgrajeno v strop delovnega prostora. Njegova naloga je poleg dodatnega filtriranja vstopnega zraka še umirjanje zračnega toka na vstopu v komoro in dušenje hrupa.

Čiščenje odpadnega zraka je izvedeno s filtrirno blazino, vgrajeno neposredno pod talno rešetko delovnega prostora ter v z žepastim filtrom v izstopnem kanalu pred izpustom v okolico.

### **3.3. Izbira krmilnih komponent**

Da lahko določimo začetne pogoje potrebne regulacije smo izvedli meritve osnovnih fizikalnih veličin, ki vplivajo na razvoj ustreznega krmilja. Za zbiranje podatkov iz procesa in posredovanje krmiljenih veličin izvršilnim elementom uporabimo krmilnik Vellman K8055N [12, 13] s 5 digitalnimi vhodi in 8 digitalnimi izhodi ter s po dvema analognima vhodoma in izhodoma. Elektronska shema vezja tega krmilnika je na sliki 3. Krmilnik ima vgrajen vmesnik USB za priklop na računalnik PC. Za krmilnik je v kompletu dodana knjižnica DLL

gradnikov za platforme Linux, Windows in Android. Krmilnik v kitu je sestavljen v samogradnji.



Slika 3: Elektronska shema vezja krmilne kartice K8055N [13]

Osebni računalnik je v konfiguraciji izbran zaradi enostavnosti strojnih posegov, dostopnih gonilnikov, robustnosti in cene.

### Tipalo temperature

Za merjenje temperature v lakirno-sušilni komori smo uporabili kalibrirani linearni temperaturni senzor Vellman 19055 [14, 15] z merilnim območjem od 0 - 100 °C. Delovne temperature v lakirno-sušilni komori se gibljejo med 20 in 80 °C.

### Tipalo nadtlaka

Nadtlak v lakirno-sušilni komori merimo z diferenčnim merilcem tlaka MPX7002 (slika 4) z delovnim območjem  $\pm 2$  kPa. Potreben nadtlak v komori se giblje med 0,2 in 0,5 kPa.

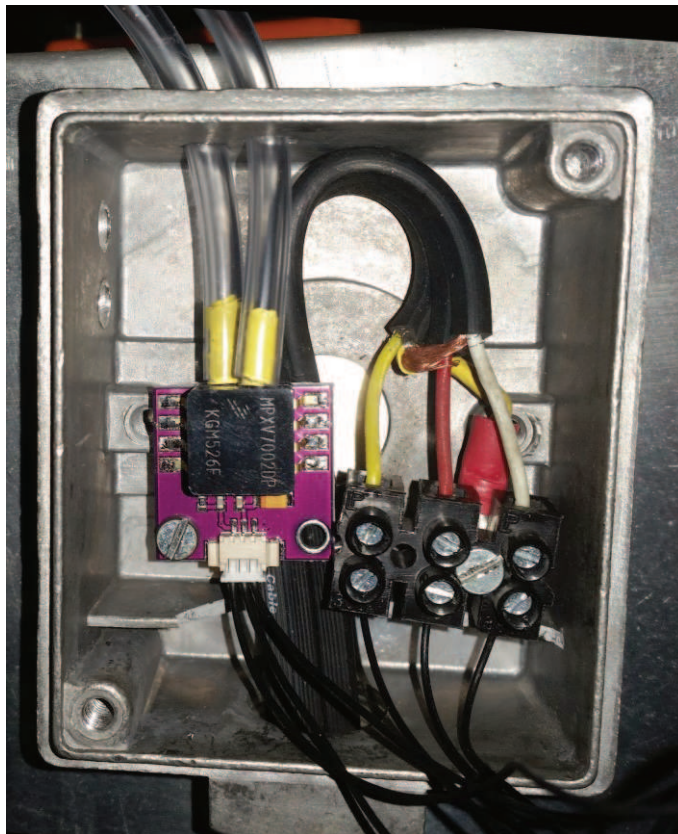


Slika 4: Izgled tlačnega senzorja MPX7002 [15]



## Tipalo hitrosti pretoka

Hitrost pretoka svežega zraka merimo z enakim diferenčnim merilcem tlaka MPX7002 [16], ki je vezan v Pitot-Prantlov merilnik hitrosti lastne izdelave. Merilnik je pritrjen na vstopni zračni kanal med turbino in umirjevalno vstopno komoro (slika 5).



Slika 5: Omarica z nameščenim tlačnim senzorjem



Slika 6: Vstopna odprtina uporabljene Pitot-Prantlove cevi

Merjenje pretoka izvedemo posredno preko razlike dinamičnega (zastojnega) in statičnega tlaka na vstopu v komoro s Pitot-Prantlovo cevjo. Senzor je nameščen na edino možno mesto (direktno merjenje v vstopni kanal v komoro med turbino in umirjevalno vstopno komoro). Pitotova cev daje pri danih obratovalnih pogojih (hitrost pretoka na merjenem mestu je med 0 in 15 m/s) premajhne razlike v izhodnih veličinah. Zaradi prevelikega merilnega območja



vgrajenega diferencialnega tlačnega senzorja in neugodnega območja merjenih veličin za Pitot-Prantlovo cev, smo napako poskušali odpraviti s povečanjem vstopne odprtine za merjenje dinamičnega tlaka (slika 6). Zaradi tega razpon merjenih veličin ne raste več linearno s tlakom, ampak s kvadratom. Vse te pomanjkljivosti pa odtehta dobljen večji razpon vrednosti na merilnem mestu. Prav tako je z ustrezno utežjo, ki jo pridobimo eksperimentalno, mogoče korigirati enačbo hitrosti toka zraka na merjenem mestu po izpeljavi iz Bernoullijeve enačbe energijskega ravnotežja v laminarnem toku

$$v = \sqrt{\frac{2(p_t - p_s)}{\rho}} \quad .$$

V tej enačbi  $v$  predstavlja hitrost pretoka zraka,  $p_t$  predstavlja skupni tlak,  $p_s$  statični tlak in  $\rho$  gostoto medija. S pomočjo izračunane hitrosti pretoka pa dokaj enostavno pridemo tudi do izračuna potrebne količine zraka skozi komoro. Vsi ti izračuni so seveda zelo približni in zgolj informativni v fazi testiranja izvedene regulacije in nastavitve začetnih parametrov.

### Frekvenčni regulatorji motornih pogonov turbin

Za zvezno regulacijo vrtljajev na obeh turbinah, sta v sistem vgrajena dva frekvenčna regulatorja Hitachi L100 [17, 18], ki sta vidna na sliki 7.



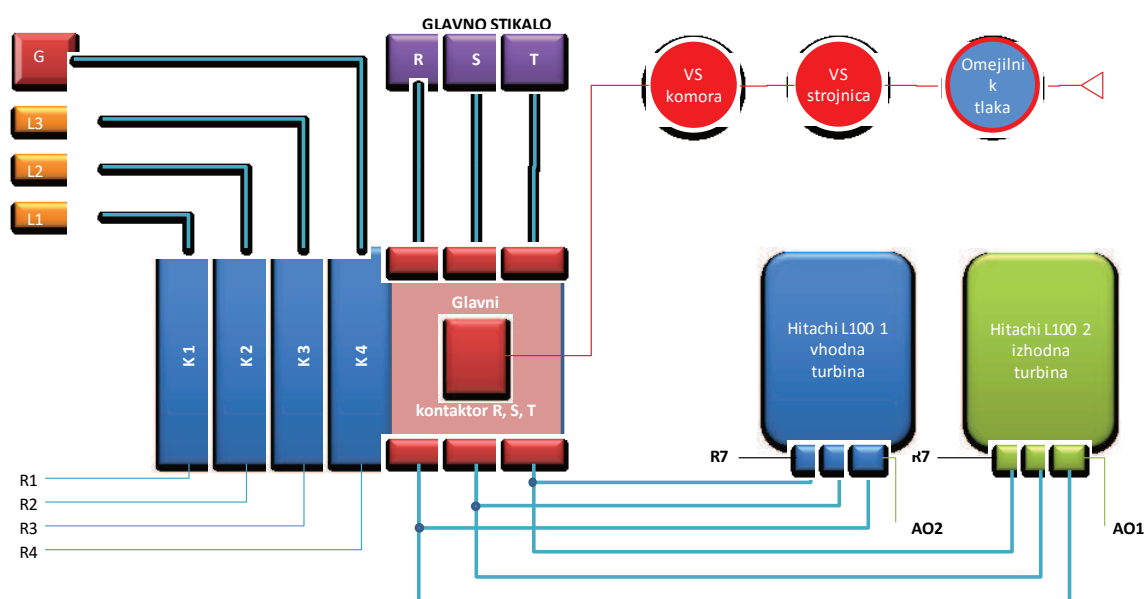
Slika 7: Frekvenčna regulatorja Hitachi L100

## Releji in kontaktorji

Vse ostale naprave vgrajene v sistem je mogoče krmiliti z digitalnimi signali različnih napetosti in zahtevanih moči. Močnostni del (slika 9) je zaradi zmanjšanja možnosti motenj vgrajen v ločeni omarici (slika 8).



Slika 8: Močnostni releji in kontaktorji



Slika 9: Shema močnostnega dela krmilja

## Varnostni elementi

V sistemu uporabljeni elementi imajo vgrajene zaščitne elemente za prisilne izklope v primeru prekoračitve mejnih vrednosti v delovanju:

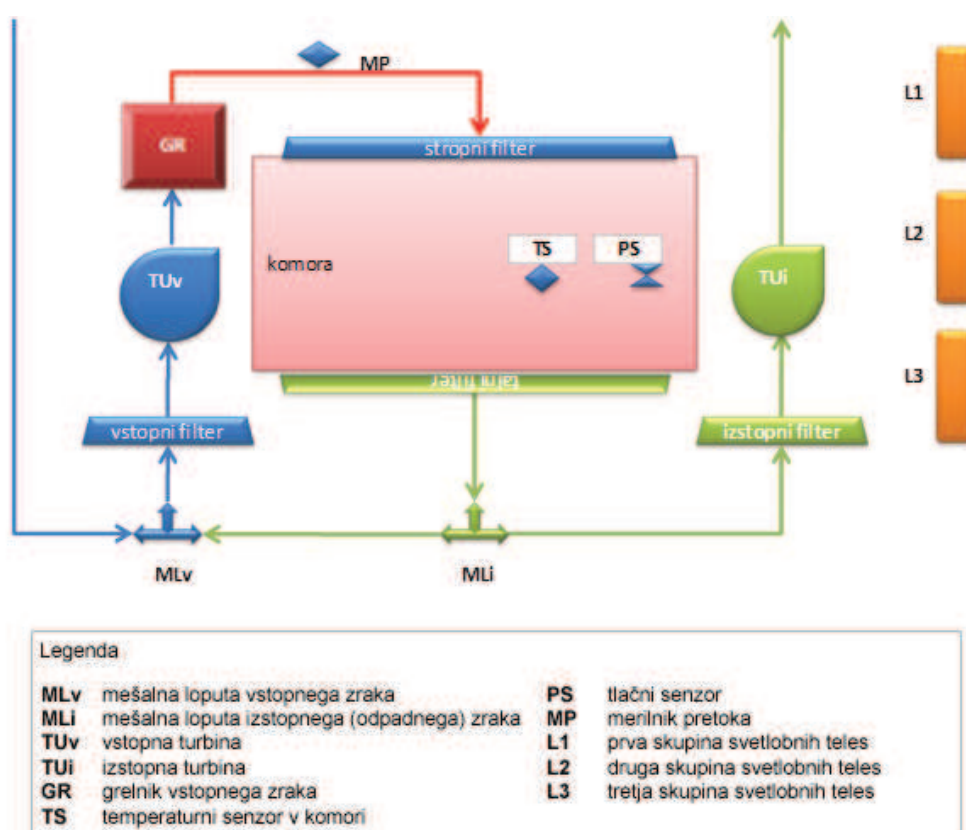
- oljni gorilnik - omejevalnik največje temperature v izmenjevalniku;

- frekvenčni regulatorji - z največjo dovoljeno izhodno frekvenco in postavitev v ničelno začetno stanje po izpadu;
- največji dovoljeni nadtlak in podtlak v komori.

Zaradi varnostno tehničnih predpisov sta v sistem krmilja nameščeni dve varnostni stikali za prisilni izklop: eno v prostoru s krmiljem in drugo v komori. V varnostni krogotok je vgrajeno tudi tlačno varnostno stikalo, ki poskrbi za samodejni varnostni izklop sistema v primeru prekoračitve mejnega spodnjega in zgornjega dovoljenega tlaka v lakirno-sušilni komori, ki je nastavljen na  $\pm 0,5$  kPa. Sistem je v vseh komponentah zasnovan tako, da se vse komponente izključijo v stanje, ki ne vpliva na ponovni zagon.

### Elektromehanska shema

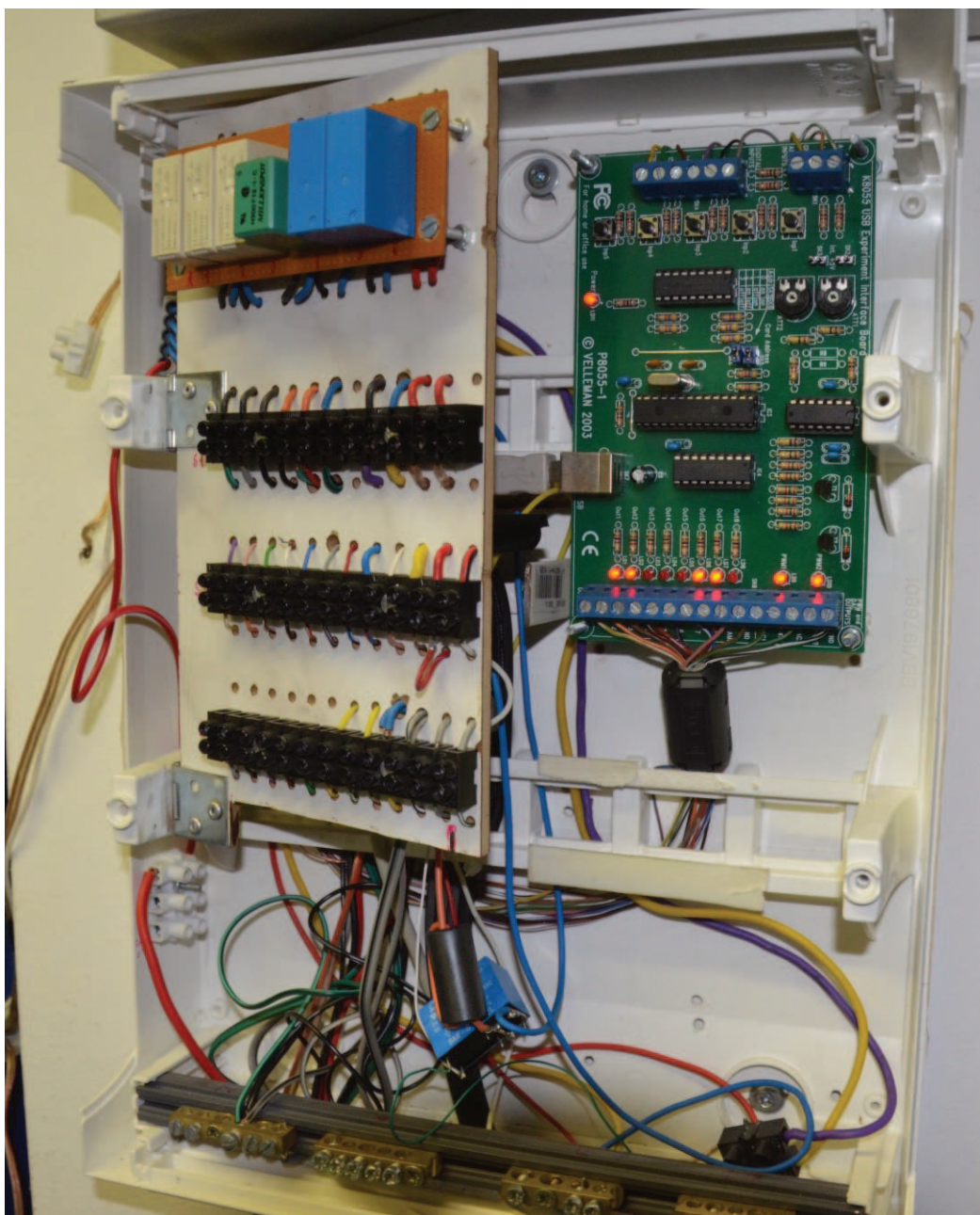
Slika 10 prikazuje sestavo obravnavane lakirno-sušilne komore z vsemi aktivnimi komponentami, ki so vključene v regulacijski sistem.



Slika 10: Situacijska shema komponent obravnavane lakirno-sušilne komore

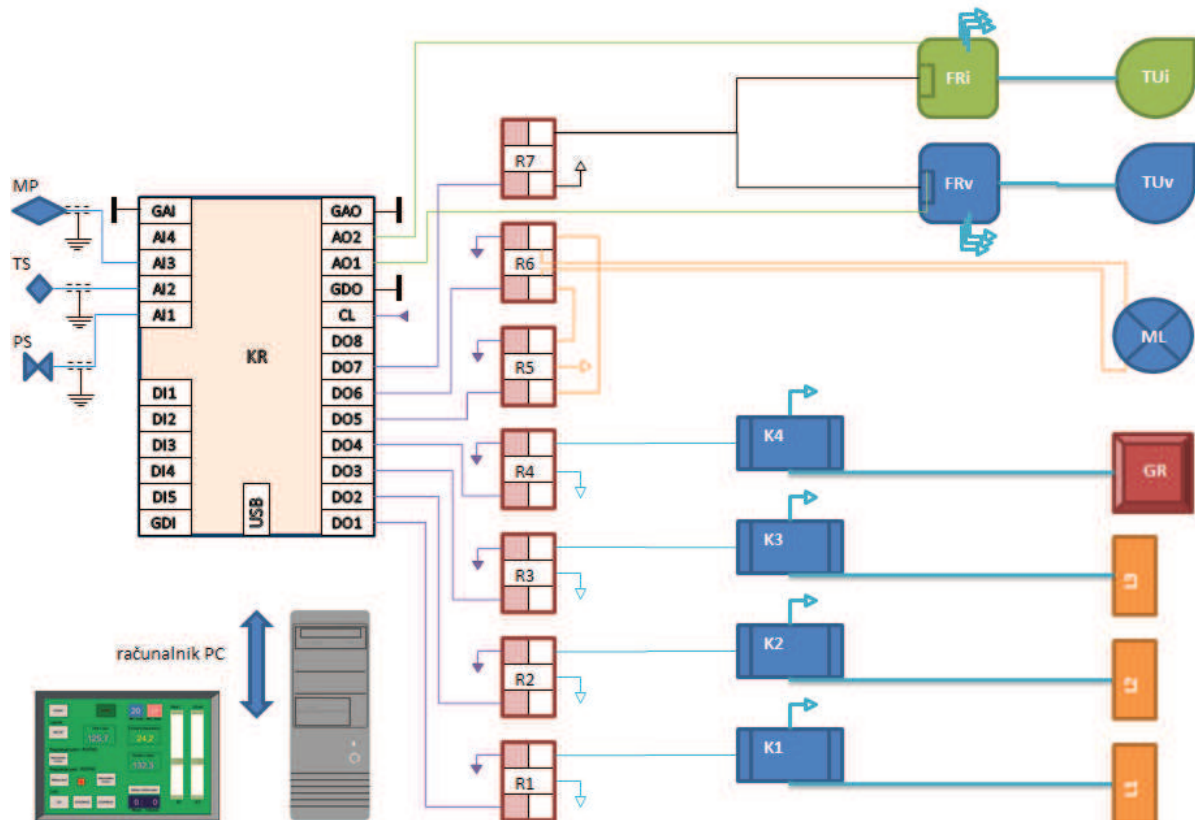
## Krmilna omarica

Slika 11 prikazuje današnji izgled krmilne omarice z vsemi vgrajenimi elementi. V levem gornjem delu je na premični stikalni plošči vidno vezje z vgrajenimi ločilnimi releji. Pod njimi so nameščene tri vrste veznih sponk. Desno zgoraj je nameščen krmilnik Vellman K8055N. Pod njim je prostor za usmernik 12 V DC, ki pa je bil kasneje nadomeščen z zmogljivejšim. Zaradi večjih dimenzij novega ni bilo več mogoče vgraditi v omarico. Na dnu omarice so nameščene kontaktne sponke L, N, 0 220V AC. Tri napetostno različna (5V, 24V, 220V) kablenska vodila so speljana ločeno za levo stikalno ploščo. Na sliki 12 je vezalna shema krmilne omarice.



Slika 11: Fotografija krmilne omarice v testni fazi





#### LEGENDA AKTIVNIH ELEMENTOV

Oznaka elementa	Opis
AI1	analogni vhod - merjenje temperature v komori
AI2	analogni vhod - merjenje nadtlaka v komori
AI3	analogni vhod - merjenje pretoka vstopnega zraka
AO1	analogni izhod - nastavitev vrtljajev vstopne turbine
AO2	analogni izhod - nastavitev vrtljajev izstopne turbine
CL	zbirna sponka digitalnih izhodov
DI1	digitalni vhod - ni uporabljen
DI2	digitalni vhod - ni uporabljen
DI3	digitalni vhod - ni uporabljen
DI4	digitalni vhod - ni uporabljen
DI5	digitalni vhod - ni uporabljen
DO1	digitalni izhod - vklop prve skupine svetil
DO2	digitalni izhod - vklop druge skupine svetil
DO3	digitalni izhod - vklop tretje skupine svetil
DO4	digitalni izhod - vklop gorilnika za ogrevanje vstopnega zraka
DO5	digitalni izhod - vklop pogona mešalnih loput
DO6	digitalni izhod - sprememba smeri napajanja pogona mešalnih loput
DO7	digitalni izhod - vklop frekvenčnih regulatorjev pogonov turbin
FRi	frekvenčni regulator pogona izstopne turbine
FRv	frekvenčni regulator pogona vstopne turbine
GAi	masa krmilnih signalov
GAO	masa krmilnih signalov
GDI	masa krmilnih signalov
GDO	masa krmilnih signalov
GR	grelnik zraka v zračnem izmenjevalniku vstopnega kanala
K1 do K4	močnostni kontaktorji
KR	krmilnik Vellman K8055N
L1 do L3	tri skupine svetlobnih teles
ML	elektromehanski sistem mešalnih loput
MP	Pitot - Prantlov merilnik pretoka MPX7002
PS	merilnik nadtlaka v delovni komori MPX7002

#### LEGENDA PASIVNIH ELEMENTOV

Oznaka elementa	Opis
— (blue)	ožičenje analognih vhodnih signalov 0 - 5 V DC
— (purple)	ožičenje digitalnih izhodnih signalov 0/5 V DC
— (green)	ožičenje analognih izhodnih signalov 0 - 5 V DC
— (light blue)	signalno ožičenje 220 V AC
— (orange)	signalno ožičenje 24 V AC
— (black)	napajalno ožičenje 12 V DC
— (dark blue)	napajalno ožičenje 220 V AC
— (brown)	napajalni priključek 12 V DC
— (brown with triangle)	napajalni priključek 24 V AC
— (ground symbol)	ozemljitev analognih vhodnih signalov
— (ground symbol)	skupna masa krmilnih signalov
— (ground symbol)	skupna masa digitalnih izhodov
— (ground symbol)	napajalni priključek digitalnih izhodnih signalov 5 V DC
— (three-phase symbol)	trifazni napajalni priključek 380 V AC
— (single-phase symbol)	enofazni napajalni priključek 220 V AC

Slika 12: Vezalna shema krmilne omarice

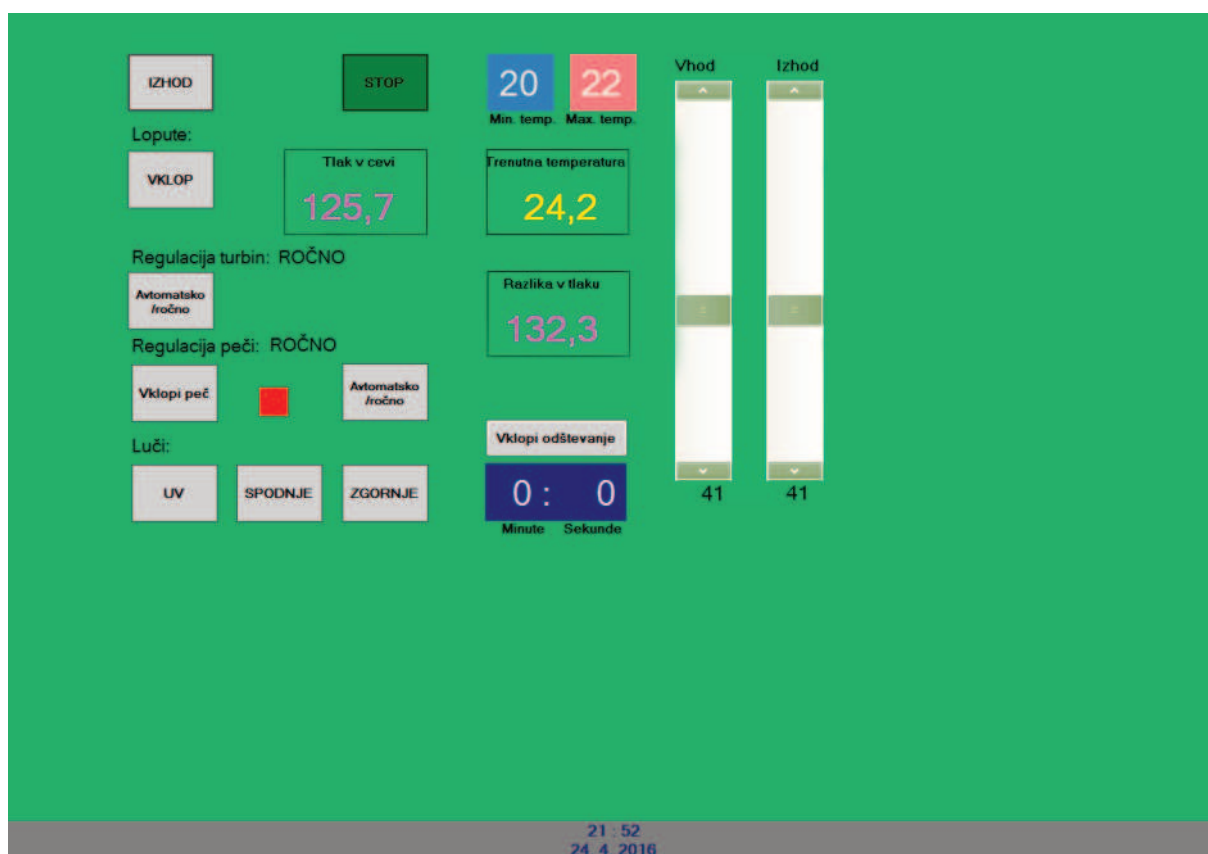


## 4. Krmilni program

### 4.1. Grafični vmesnik

Za upravljanje imamo dva monitorja, en je v komori, drugi pa v prostoru, kjer so ostali spremljajoči elementi. Ker je tisti v notranjosti lakirno-sušilne komore občutljiv na dotik, je tudi grafični vmesnik temu prilagojen. Pomembno je bilo, da je prikaz čim bolj kontrasten, da so gumbi in drugi elementi čim boljše vidni. Prav tako so vsi elementi nekoliko večji, da je upravljanje čim lažje (tudi v zaščitnih rokavicah). Program teče v celozaslonskem načinu, tako da na ekranu ni drugih motečih elementov, je pa bilo zato potrebno dodati prikaz trenutnega časa, ki je na dnu grafičnega vmesnika, ki je prikazan na sliki 13.

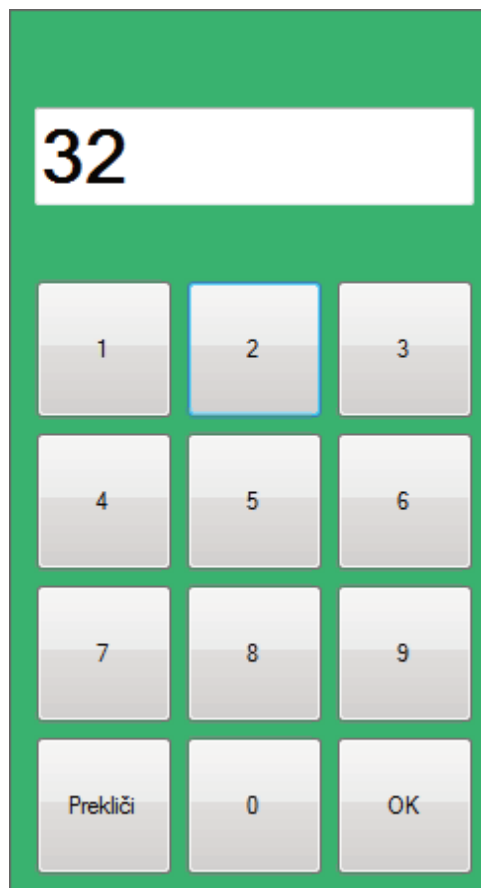
Za implementacijo je uporabljen programski jezik C#, saj za ta jezik obstajajo knjižnice za krmiljenje krmilnika Vellmann K8055, prav tako pa je program pregleden in lahko berljiv.



Slika 13: Uporabniški vmesnik

Mogoča sta dva načina delovanja, in sicer ročni in avtomatski. Posebej lahko izberemo način delovanja peči in turbin, s katerimi krmilimo pretok zraka in tako uravnavamo tlak v sami komori. Za samodejno krmiljenje peči imamo na voljo dva parametra, in sicer spodnjo mejo, pri kateri se peč vklopi, ter zgornjo mejo, pri kateri se peč izklopi. Ta dva parametra določimo tako, da pritisnemo na okvirček, v katerem je izpisana minimalna oziroma maksimalna

temperatura. Ob tem se pojavi okno s številčnico (slika 14), s pomočjo katere vnesemo želeno vrednost. To potrebujemo zaradi upravljanja v komori, kjer nimamo tipkovnice. Če sistem upravljamo na zunanjem krmilnem mestu, lahko vrednosti vnesemo tudi s pomočjo tipkovnice.



Slika 14: Vmesnik za vnos zelene temperature

Desno od prikaza nastavljenih parametrov za krmiljenje peči sta dva vertikalna drsnika. S tema drsnikoma krmilimo frekvenco vhodne in izhodne turbine. Pri avtomatskem reguliranju pretoka in tlaka se zaradi lažjega odčitavanja drsnika sproti prilagajata trenutni vrednosti. Ciljne vrednosti za pretok in tlak v komori ter drugi parametri za krmiljenje so shranjeni v konfiguracijski datoteki, saj so te vrednosti zmeraj enake oziroma so odvisne samo od tehnološkega postopka.

Na voljo so tudi trije okvirji, v katerih se izpisuje temperatura v komori, pretok zraka v vhodnem kanalu in razlika med tlakom v komori in atmosferskim tlakom. Te vrednosti so povprečje izmerjenih vrednosti, zaokroženo na eno decimalko. Ker gre za prototip je za izpis razlike v tlaku in pretoka uporabljena prebrana vrednost iz krmilnika, ki je omejena na



vrednosti med 0 in 255. Dolžine intervalov, na katerih računamo povprečne vrednosti, in frekvenco osveževanja prikaza lahko prav tako določimo v konfiguracijski datoteki.

Imamo tudi tri gumbе, s katerimi lahko vklopimo oziroma izklopimo tri skupine luči. Če so luči vklopljene, se gumb obarva zeleno, tako da je hitro razvidno, katere luči so vklopljene. Iz zunanjega krmilnega mesta namreč ne vidimo v lakirno komoro. Zraven teh gumbov je možno nastaviti čas do izklopa turbin, kar se uporablja predvsem pri fazi sušenja, ali ko je komoro potrebno prezračiti. Med fazo lakiranja se to ne uporablja, saj je čas tu odvisen od količine in hitrosti dela, kar se seveda zelo razlikuje od primera do primera. Enako kot pri nastavljanju temperature, se tudi tukaj ob pritisku na polje s prikazom vrednosti odpre okno z možnostjo vnosa. Posebej moramo nastaviti minute in sekunde. Z gumbom *vklopi odštevanje* se ob zagonu turbin vklopi tudi odštevanje. Med delovanjem lahko to odštevanje tudi izključimo. Po nastavljenem času se ustavijo turbine in izključi peč.

Na levi strani pod območjem za krmiljenje peči je krmiljenje loput v zračnih kanalih. S tem nastavimo režim zračenja, torej ali gre za kroženje zraka v komori (faza sušenja), ali pa za dovajanje zunanjega zraka pri lakiranju in odzračevanju komore. Pod gumbom za spremembo položaja loput je izpisan trenuten položaj. Med delovanjem turbin položaja loput ni možno spreminjati. Prav tako moramo po premiku loput počakati določen čas, preden lahko zaženemo turbine. Ta čas je nastavljen z parametrom v datoteki xml z nastavitvami.

## 4.2. Osnovni algoritem

Program ob zagonu prebere nastavitve iz datoteke xml, kjer so shranjeni parametri, kot so na primer:

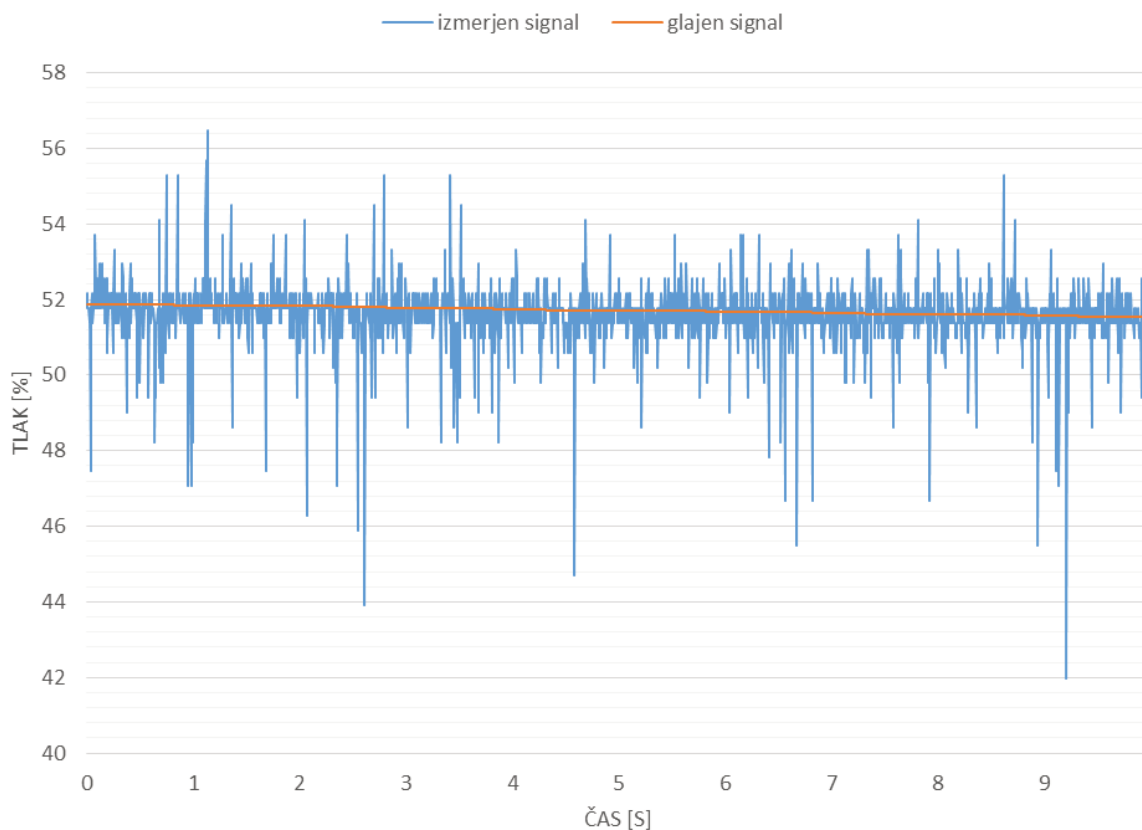
- dolžina intervala, na katerem računamo povprečno vrednosti tlaka oziroma temperature;
- interval med osveževanjem izpisa izmerjenih vrednosti;
- interval med prilagoditvijo frekvence turbin;
- čas trajanja premika turbin;
- nastavitve beleženja zgodovine (vklop/izklop beleženja, lokacija dnevnikov, količina podrobnosti);
- vklop simulacije – v tem načinu lahko vhodne podatke namesto iz senzorjev beremo iz datoteke .csv;
- parametri za posamezne načine regulacije (pri regulatorju PID na primer so to parametri  $K_P$ ,  $K_D$ ,  $K_I$ , dovoljeno odstopanje od želene vrednosti, največja dovoljena sprememba frekvence);
- uporabljen algoritem za regulacijo tlaka in pretoka;
- zelena vrednost pretoka in tlaka v komori.

Za branje vhodnih podatkov je uporabljen časovnik, ki vsakih 5 milisekund sproži branje vseh treh analognih senzorjev. Vrednosti doda v vrsto, najstarejšo vrednost pa iz nje izbriše. Glede na nastavljene parametre po določenem številu ciklov izračunamo povprečje hranjenih vrednosti in jih izpišemo. Nato v primeru, da so turbine vklopljene in imamo izbrano samodejno regulacijo, izračunamo nove vrednosti frekvenc in jih nastavimo. Prav tako preverimo temperaturo in po potrebi vključimo oziroma izključimo peč.

Za lažje testiranje lahko v nastavitvah vklopimo način simulacija. V tem načinu vhodne podatke namesto iz krmilja beremo iz datoteke .csv. To je predvsem uporabno za testiranje glajenja signalov, če imamo shranjene izmerjene vrednosti. Prav tako lahko izvedemo osnovne teste same regulacije, saj vidimo, ali je prilagajanje frekvence v skladu s pričakovanji, čeprav te seveda v tem primeru nimajo vpliva na vhodne podatke, ki jih beremo iz datoteke.

### **4.3. Glajenje vhodnih signalov**

Vhodne podatke za regulacijo temperature in tlaka, torej temperaturo v komori, pretok v dovodnem kanalu in razliko med tlakom v komori in zunanjim tlakom, preberemo iz analognih vhodov. Pri tem so se pojavila zelo velika nihanja oziroma motnje v signalu. Posebej izrazita so bila pri tlaku in pretoku. Pri meritvah temperature je zadostovalo računanje povprečja zadnjih 100 meritev, ki jih vzorčimo na 5 ms, torej zadnje pol sekunde. Pri meritvah tlaka pa so bile motnje tako velike, da je bil tudi z računanjem povprečja rezultat neuporaben. Zato smo interval, za katerega računamo povprečje, podaljšali na 1500 ciklov, se pravi 7,5 sekund. Prav tako smo pregledali vezje, kjer smo ugotovili napako pri vezavi ozemljitve. S tem so se motnje dodatno zmanjšale, dobili pa smo zelo konstantne vrednosti. Za tlak je stabilnost ključnega pomena, saj je željeno, da se frekvenca turbin, ko dosežemo željeno vrednost, čim manj spreminja. Prav tako ob večjih nihanjih izmerjenega tlaka ali pretoka v kanalu regulacija potrebuje nekaj časa, preden se razmere ponovno umirijo. Pri enostavnejši različici regulacije, ki je opisana v nadaljevanju, pa se je celo dogajalo, da je sistem postal nestabilen, torej da je prišlo do prevelikega oziroma do prenizkega tlaka v lakirno-sušilni komori, kar je vodilo do izpada sistema zaradi prekoračitve mejnih vrednosti. Slika 15 prikazuje izmerjen tlak v komori in vrednosti, ki smo jih dobili z glajenjem teh vrednosti z računanjem povprečnih vrednosti.

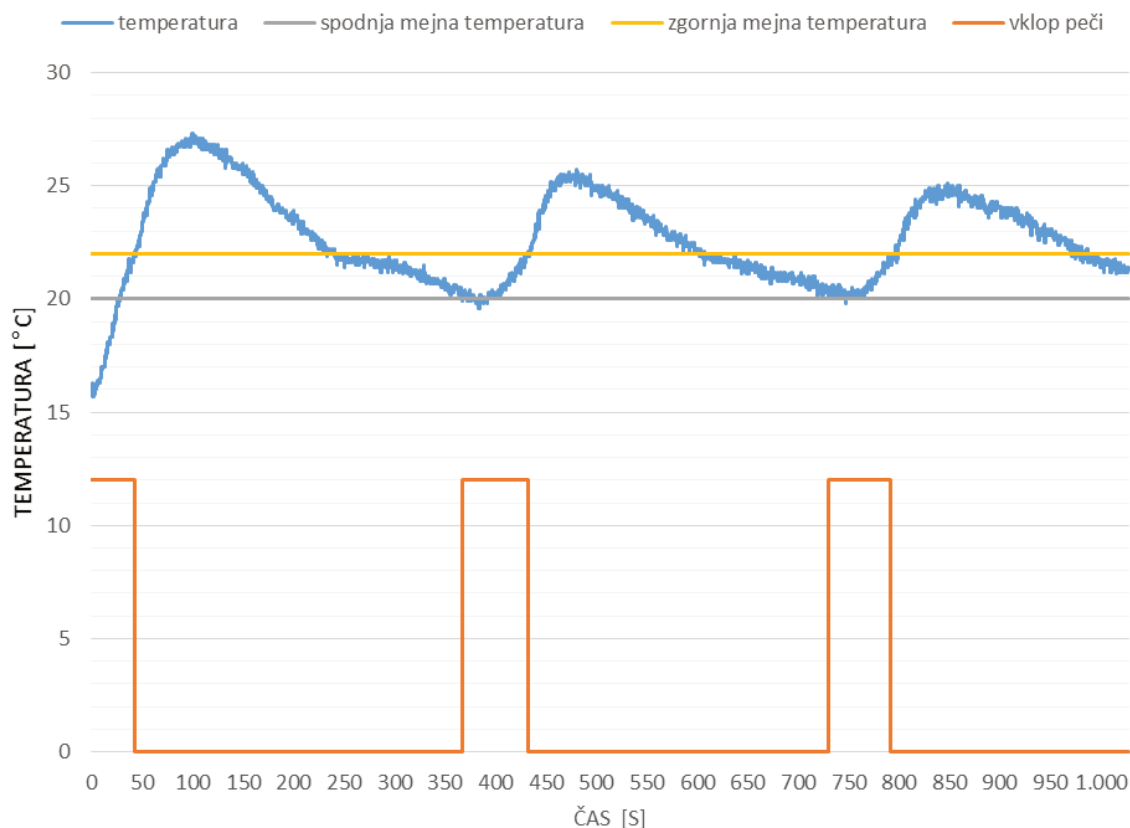


Slika 15: Glajenje vhodnega analognega signala

#### 4.4. Regulacija peči

V sistemu reguliramo tri veličine, in sicer pretok zraka v dovodnem kanalu, nadtlak v sami komori in temperaturo zraka. Razlika pri regulaciji v teh treh primerih je v tem, da imamo pri regulaciji temperature stopenjsko (dvotočkovno) regulacijo, pri pretoku zraka in nadtlaka v komori pa krmiljenje moči delovanja turbin nastavljamo zvezno na vrednosti med 0 in 100.

Za krmiljenje peči je bil uporabljen preprost algoritem, ki ima dva parametra, in sicer mejo za vklop in mejo za izklop peči. Ko temperatura v komori preseže zgornjo mejo, se peč izklopi, ko pa se spusti pod spodnjo mejo, se ponovno vklopi. Zato temperatura zaniha izven območja med nastavljenimi vrednostmi. Pri nastavljanju je potrebno vedeti, da ne gre za najnižjo in najvišjo temperaturo, ampak za mejo, kdaj se naj peč vklopi oziroma izklopi. Te nihaje je namreč težko natančno napovedati, saj so odvisni od mnogih dejavnikov, kot so na primer zunanja temperatura, trenutni pretok zraka, režim delovanja, temperatura zračnih kanalov.



Slika 16: Gibanje temperature ob vklapljanju in izklapljanju peči

Iz grafa na sliki 16 je razvidno, da ima hladni zagon ogrevanja bistveno večjo vztrajnost kot nadaljnji regulacijski cikli. Izkaže se tudi, da je velikost prekoračitve mejne temperature odvisna od višine želene temperature in velikosti tolerančnega območja, saj pri višjih vrednostih in ožjem tolerančnem območju temperatura ne prekorači meje izklopa za toliko kot pri nižjih.

#### 4.5. Regulacija pretoka in nadtlaka

Za regulacijo pretoka in tlaka smo uporabili dvotočkovno regulacijo. Pri dvotočkovni regulaciji imamo dva parametra, ki določata, za koliko se spremeni frekvenca v odvisnosti od napake. Velikost spremembe izberemo s pomočjo parametra, ki določa, pri kolikšni napaki izberemo večjo oziroma manjšo spremembo. Če je absolutna vrednost napake večja od tega parametra, izberemo večjo spremembo, drugače pa manjšo. S tem dosežemo, da se tlak čim prej približa izbrani vrednosti, nato pa z manjšimi spremembami dosežemo to vrednost. S tem tudi skušamo odpraviti težavo prevzpona, saj se hitrost turbin, ko smo v bližini zelenega območja, dviguje počasneje in zato težje preseže želeno vrednost. Prav tako imamo določen parameter, ki dopušča dovoljeno velikost odstopanja od želene vrednosti, ki je sprejemljivo, saj je bil en izmed pogojev, da turbine, ko se sistem umiri, tečejo čim bolj enakomerno, in se frekvenca turbin čim manj spreminja.

Algoritma (slika 17 in slika 18) sta zelo podobna, razlika je v tem, katerim turbinam spremenita frekvenco.

```
public void izracunajHitrostTurbin(Podatki podatki) {
    cikel++;

    int jakostVhodnaTurbina = podatki.getJakostTurbinaVhod();
    int jakostIzhodnaTurbina = podatki.getJakostTurbinaIzhod();

    if (cikel > stCiklovMedSprememboJakostiTurbin && podatki.getDosezenPretok()) {
        cikel = 0;
        double napaka = tlakKomoraSetpoint - podatki.getTlakKomora();

        if (Math.Abs(napaka) > dovoljenaNapaka) {
            // izberemo spremembo za mali ali veliki korak
            trenutniKorak = (Math.Abs(napaka) > mejaNapake) ? korakVeliki : korakMajhen;

            if (napaka > 0) {
                //pre nizek tlak - ce gre zmanjsamo izhod, drugace povisamo vhod
                if ((jakostIzhodnaTurbina - trenutniKorak) < spodnjaMeja) {
                    jakostVhodnaTurbina = jakostVhodnaTurbina + trenutniKorak;
                } else {
                    jakostIzhodnaTurbina = jakostIzhodnaTurbina - trenutniKorak;
                }
            } else {
                //previsok tlak - ce gre povisamo izhod, drugace znizamo vhod
                if ((jakostIzhodnaTurbina + trenutniKorak) > zgornjaMeja) {
                    jakostVhodnaTurbina = jakostVhodnaTurbina - trenutniKorak;
                } else {
                    jakostIzhodnaTurbina = jakostIzhodnaTurbina + trenutniKorak;
                }
            }
            podatki.setJakostTurbinaVhod(
                SignalUtil.omejitevSignala(jakostVhodnaTurbina, spodnjaMeja, zgornjaMeja)
            );
            podatki.setJakostTurbinaIzhod(
                SignalUtil.omejitevSignala(jakostIzhodnaTurbina, spodnjaMeja, zgornjaMeja)
            );
        }
    }
}
```

Slika 17: Dvotočkovna regulacija tlaka v komori

```

public void izracunajHitrostTurbin(Podatki podatki) {
    cikel++;

    int jakostVhodnaTurbina = podatki.getJakostTurbinaVhod();
    int jakostIzhodnaTurbina = podatki.getJakostTurbinaIzhod();

    if (cikel > stCiklovMedSprememboJakostiTurbin) {
        cikel = 0;
        double napaka = tlakCevSetpoint - podatki.getTlakCev();

        if (Math.Abs(napaka) > dovoljenaNapaka) {
            // izberemo spremembo za mali ali veliki korak
            trenutniKorak = (Math.Abs(napaka) > mejaNapake) ? korakVeliki : korakMajhen;

            if (napaka > 0) {
                //prenizek tlak - povisamo vhod in izhod
                jakostVhodnaTurbina = jakostVhodnaTurbina + trenutniKorak;
                jakostIzhodnaTurbina = jakostIzhodnaTurbina + trenutniKorak;

            } else {
                //previsok tlak - znizamo oba
                jakostVhodnaTurbina = jakostVhodnaTurbina - trenutniKorak;
                jakostIzhodnaTurbina = jakostIzhodnaTurbina - trenutniKorak;
            }
            podatki.setJakostTurbinaVhod(
                SignalUtil.omejitevSignala(jakostVhodnaTurbina, spodnjaMeja, zgornjaMeja)
            );
            podatki.setJakostTurbinaIzhod(
                SignalUtil.omejitevSignala(jakostIzhodnaTurbina, spodnjaMeja, zgornjaMeja)
            );
        } else {
            podatki.setDosezenPretok(true);
        }
    }
}

```

Slika 18: Dvotočkovna regulacija pretoka v dovodnem kanalu

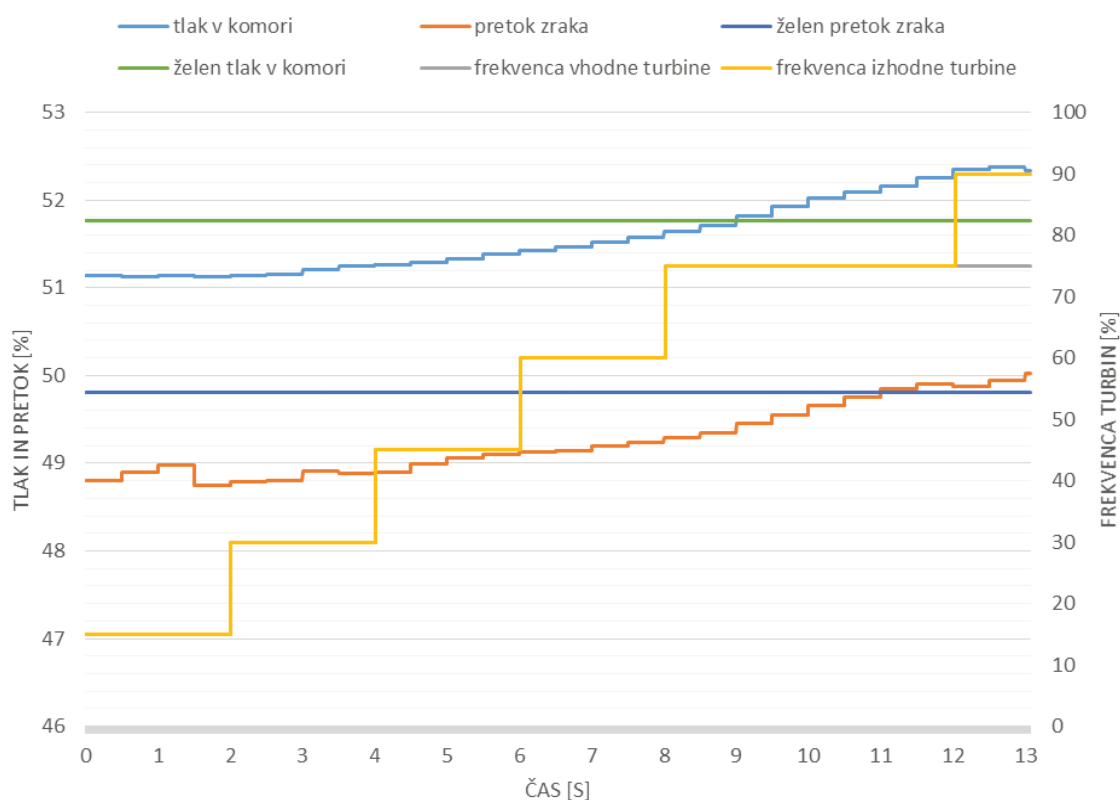
Regulator pretoka vedno spremeni frekvenco obeh turbin hkrati (slika 17), regulator pretoka pa najprej poskusi prilagoditi frekvenco izhodne turbine (slika 18). Samo v primeru, da bi s spremembo frekvence prekoračil največjo možno frekvenco, oziroma bi bila manjša od nič, spremeni frekvenco vhodne turbine. S tem dosežemo, da je pretok v vhodnem kanalu čim bolj konstanten.

### Določanje parametrov

Prva težava, na katero smo naleteli, je bila pravilna nastavitve parametrov, ki določata, za koliko se v vsakem ciklu, v katerem prilagajamo frekvence turbin, le te spremenijo. Večja sprememba nam omogoča hitrejši doseg želenega pretoka in tlaka v komori, vendar obstaja večja nevarnost, da zgrešimo oziroma presežemo željeno vrednost. Prav tako lahko zaradi prevelikih sprememb pride do prevelikega podtlaka oziroma nadtlaka. V primeru prevelikega nadtlaka se odprejo vrata komore, pri prevelikem podtlaku pa varnostno stikalo izklopi turbine. Ker se sistem ne obnaša enako pri nizkih in visokih obratih, je bila težava tudi, da je ob zagonu (pri nizkem pretoku) regulator za doseganje želenega nadtlaka v komori potreboval večjo razliko med frekvenco vhodne in izhodne turbine, kot pri večjem pretoku. Zato je z dvigovanjem pretoka naraščal tudi nadtlak v komori in je prišlo do izpada sistema zaradi prekoračitve mejnih vrednosti. To smo odpravili tako, da najprej frekvenco obeh turbin skupaj

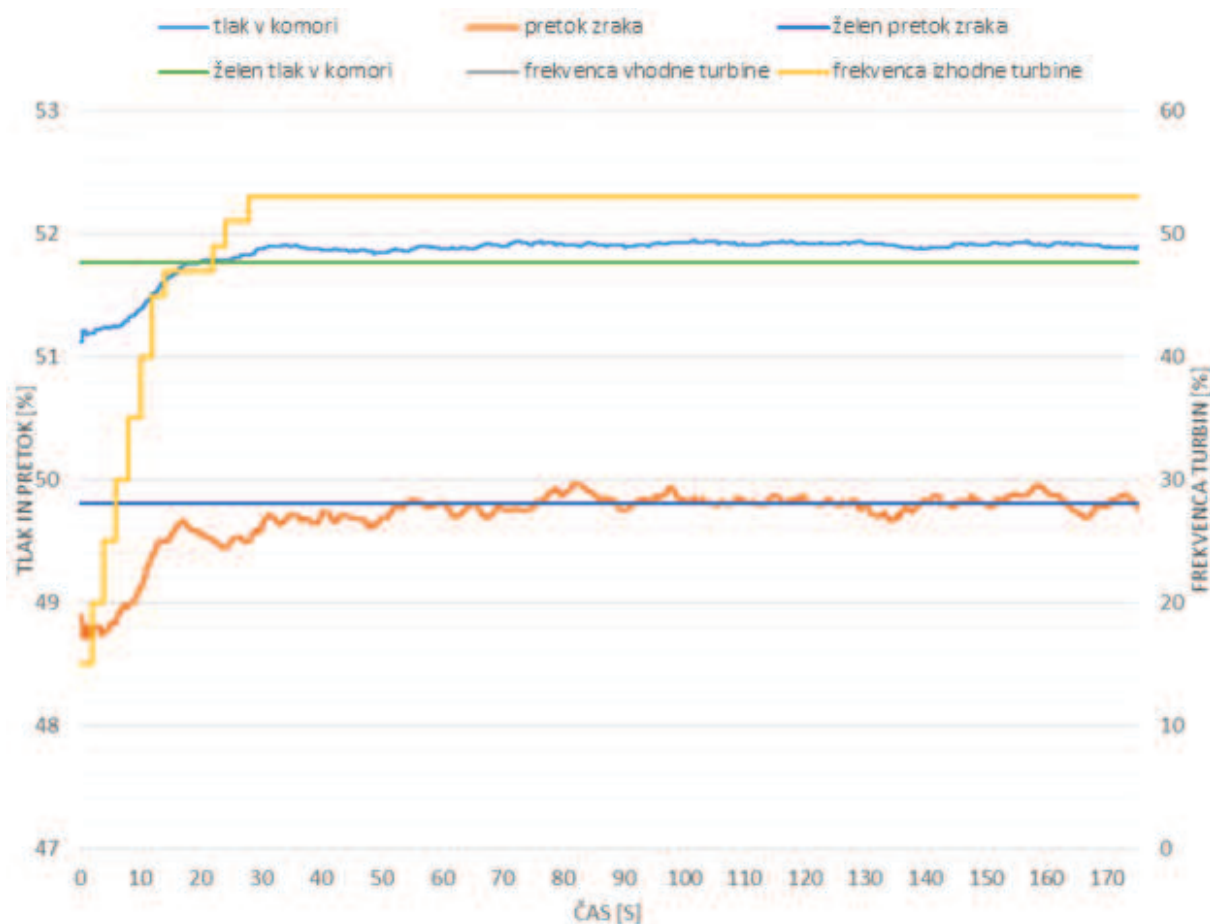
dvigujemo, dokler ne dosežemo želenega pretoka (oziroma pridemo v območje, ki ima napako, manjšo od dovoljenega odstopanja), šele takrat pa vklopimo drugi regulator, ki nam nastavi primerno razliko med frekvenco turbin, s čimer dosežemo želeni nadtlak v komori. S tem pa seveda dodatno povečamo čas od zagona do stabilizacije, saj moramo najprej doseči želen pretok, šele nato se lahko začne prilagajanje izhodne turbine, da dosežemo želen nadtlak v komori. Pri zelo zamašenih filtrih bi to lahko tudi vodilo do izpada sistema zaradi prekoračitve mejnih vrednosti. Takrat je razlika med vhodno in izhodno turbino nekoliko večja, saj mora izhodna turbina delovati z višjo frekvenco, da dosežemo enak nadtlak. Do tega sicer naj ne bi prišlo, saj se običajno filtri menjajo že prej. To je pomembno pri zagotavljanju zanesljivosti, saj v tem primeru regulacija ne more zagotoviti normalnega delovanja.

Zaradi enakomernejših razmer smo najprej sistem zagnali brez ogrevanja zraka in se s tem izognili vplivu spremembe temperature na pretok zraka. Na ta način je lažje ugotoviti, ali so parametri za regulacijo pretoka ustrezno nastavljeni. Meja za izbiro velike oziroma majhne spremembe frekvence je bila nastavljena na 0,4 %, dovoljeno odstopanje od želene vrednosti pa na 0,2 %. V primeru, da je napaka večja od 0,4 %, smo velikost spremembe frekvence turbin sprva nastavili na 5,8 %, da bi čim prej dosegli želen pretok. Na grafu (slika 19) je razvidno, da nam ta nastavitev sicer omogoča hitro doseganje želenega pretoka, vendar pa se prav tako povišuje tudi nadtlak v komori.



Slika 19: Dvotočkovna regulacija brez ogrevanja – izpad sistema zaradi previsokega nadtlaka

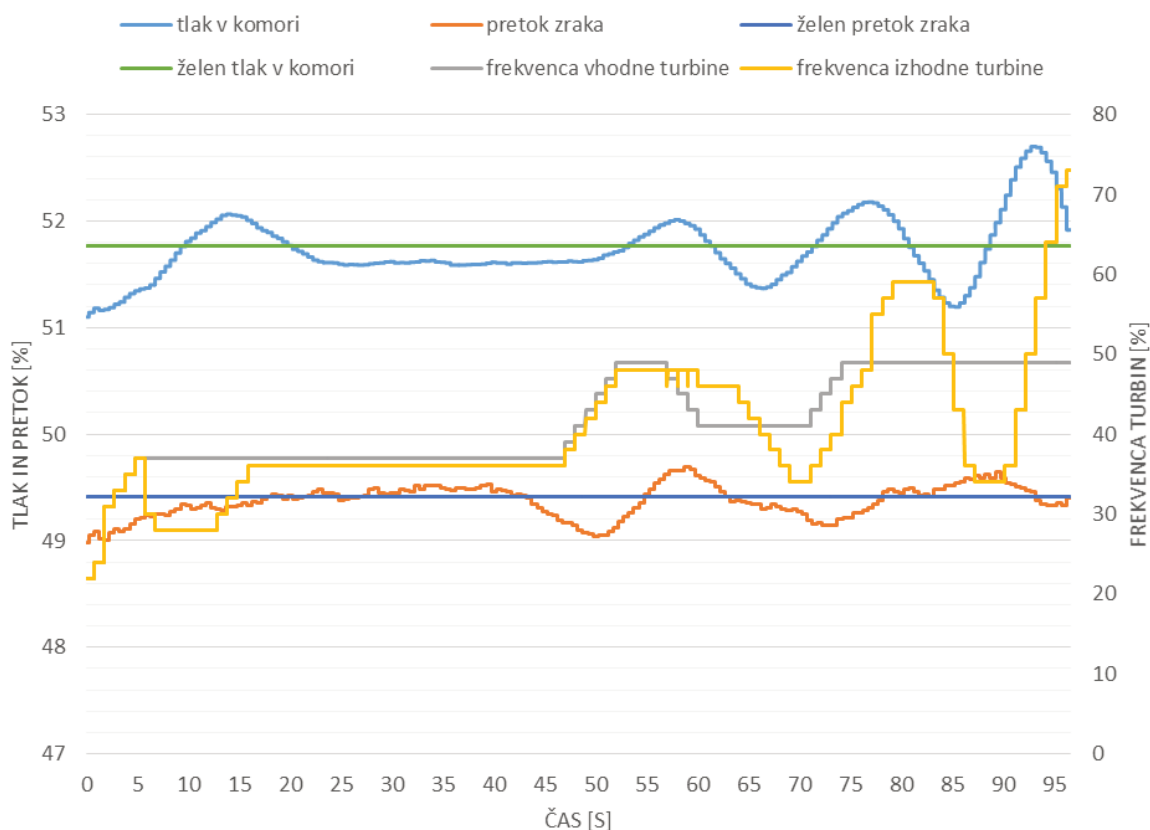
Zaradi tega smo zmanjšali velikost spremembe frekvence, kar seveda pomeni, da se je podaljšal čas do dosega želenega pretoka ob zagonu, vendar nam poveča zanesljivost in zmanjša tveganje, da sistem zaradi hitrih večjih sprememb uide iz dovoljenih območij delovanja. Slika 20 prikazuje rezultate z manjšo velikostjo spremembe, pri čemer pa se je tudi čas vzpona do želene vrednosti povišal na približno 30 sekund.



Slika 20: Dvotočkovna regulacija brez ogrevanja

Čeprav so bili prvi preizkusi uspešni, se je vseeno občasno zgodilo, da je zaradi nihanja v pretoku zraka prišlo do motenj, ki jih ta način regulacije ni uspel umiriti, saj so postajale vse večje, kar prikazuje slika 21.

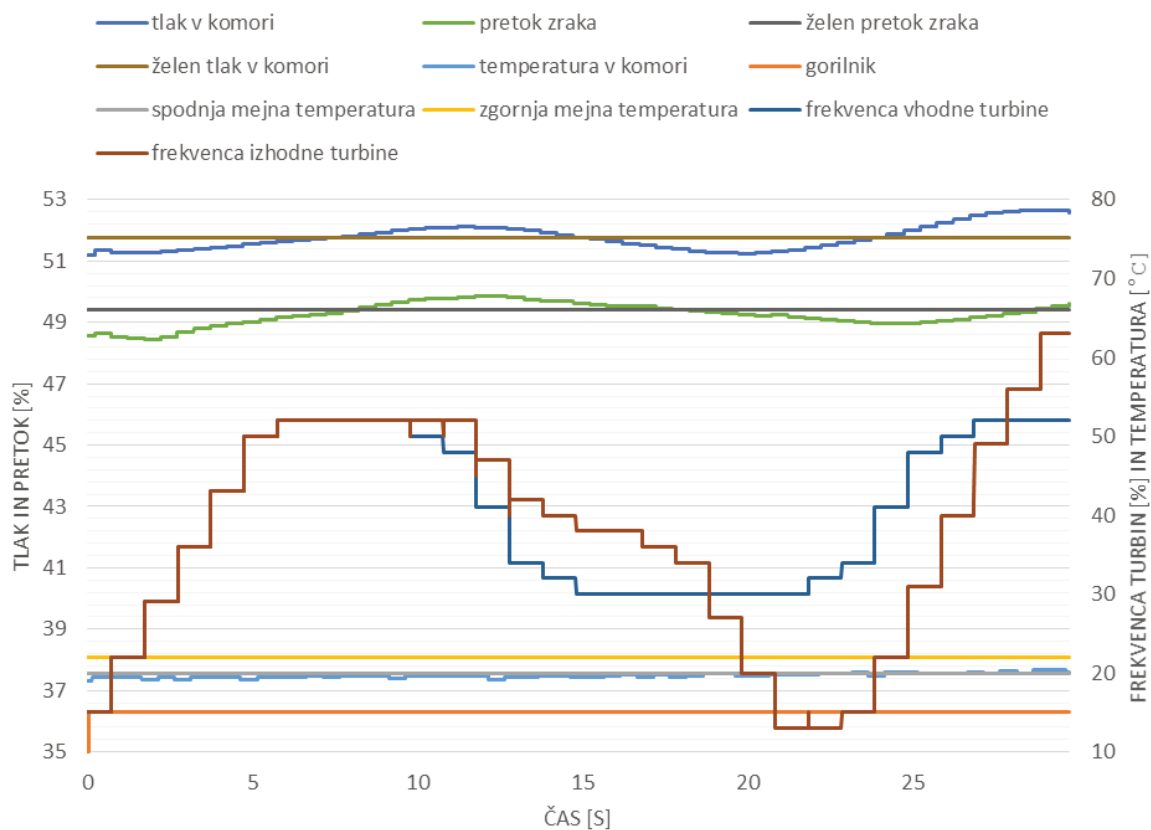




Slika 21: Dvotočkovna regulacija brez ogrevanja - pojav nihanja vodi do prekinitve procesa

### Regulacija z vključenim ogrevanjem

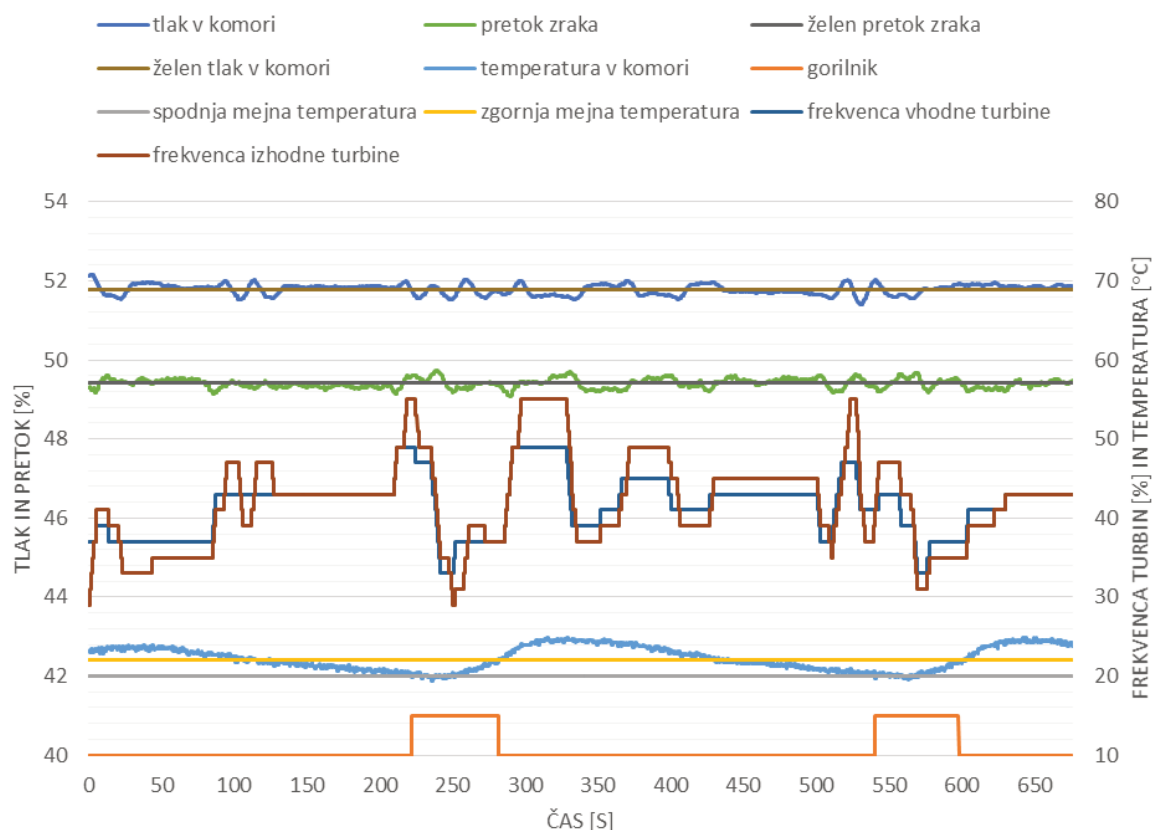
Te težave se še povečajo pri vklopljenem krmiljenju peči. Zaradi segrevanja in ohlajevanja zraka se pojavijo spremembe tako v pretoku, kot tudi v tlaku v komori. Regulator mora ta nihanja čim prej absorbirati in znova ustaliti frekvenco turbin. Velikost velike spremembe frekvence se je izkazala za preveliko, saj se je ob segrevanju zraka pretok spremenil za več kot 0,4 %, zaradi česar je regulator v naslednjem ciklu izbral večjo spremembo frekvence frekvence, kar je povzročilo hitro spremembo tlaka v komori. Zato se spremeni tudi razlika med frekvencami in s tem vedno večja nihanja v tlaku, podobno kot je bilo prikazano na prejšnjem grafu (slika 21). Nadtlak v komori se je toliko povečal, da je prišlo do izklopa varnostnega tlačnega stikala, saj drugi regulator ni uspel pravočasno prilagoditi razlike v frekvenci obeh turbin. Tak primer prikazuje slika 22.



Slika 22: Dvotočkovna regulacija z ogrevanjem – izpad sistema zaradi prevelikega nadtlaka

Ta učinek smo ublažili oziroma delno odpravili z zmanjšanjem velikosti večje spremembe frekvenca, se pravi ko je razlika med želeno in izmerjeno vrednostjo tlaka v komori ali zračnem kanalu večja od 0,4 %, kar prikazuje slika 23. Vendar pa se s tem ponovno poveča verjetnost napak, zaradi katerih smo velikost spremembe pred tem zmanjšali.

Rešitev bi verjetno bila v več različnih velikostih možne spremembe frekvenca, vendar pa s tem kljub večji kompleksnosti ne bi mogli odpraviti vseh pomanjkljivosti, kot je na primer prilagoditev frekvenca turbin znotraj sprejemljivega območja. Zato smo uporabili drug način regulacije, regulacijo PID, ki te pomanjkljivosti odpravi.



Slika 23: Dvotočkovna regulacija z ogrevanjem

#### 4.5.1. Regulacija PID

Napake, ki so se pojavljale pri prejšnjem načinu regulacije, lahko odpravimo z uporabo regulatorjev PID. Za razliko od dvotočkovnega algoritma regulator v tem primeru ni omejen na dve fiksni velikosti spremembe frekvence, temveč lahko sprememba zavzame katerokoli vrednost.

Tudi regulatorja PID delujeta tako, da regulator pretoka frekvenci obeh turbin spremeni enako (slika 24), se pravi ohranja razliko, regulator tlaka v komori pa to razliko spreminja, da dosežemo želeni nadtlak. Enako kot pri prejšnjem načinu tudi tukaj, če je možno, spremenimo frekvenco izhodne turbine (slika 25), saj s tem pretok v vhodnem kanalu ostane enak. V primeru, da bi nova frekvenca odstopala od dovoljenih vrednosti, pa spremenimo frekvenco vhodne turbine. Dovoljeno odstopanje je tudi tukaj nastavljeno na 0,2 %.

```

public void izracunajHitrostTurbin(Podatki podatki) {
    cikel++;
    if (cikel > stCiklovMedSprememboJakostiTurbin) {
        cikel = 0;
        double napaka = setpoint - podatki.getTlakCev();
        double proportional = 0;

        if (Math.Abs(napaka) > dovoljenaNapaka) {
            proportional = napaka;
        }
        double razlikaVNapaki = proportional - zadnjaNapaka;

        prejsnjeNapake.Add(napaka);

        if (prejsnjeNapake.Count > steviloPrejsnjihNapak) {
            prejsnjeNapake.RemoveAt(0);
        }
        vsotaNapak = prejsnjeNapake.Average();

        double sprememba = Kp * proportional + Ki * vsotaNapak + Kd * razlikaVNapaki;

        sprememba = SignalUtil.omejitevSignala((int)sprememba, 0 - korakVeliki, korakVeliki);

        int vhodnaTurbina = podatki.getJakostTurbinaVhod() + (int)sprememba;
        int izhodnaTurbina = podatki.getJakostTurbinaIzhod() + (int)sprememba;

        podatki.setJakostTurbinaVhod(SignalUtil.omejitevSignala(vhodnaTurbina, 0, 100));
        podatki.setJakostTurbinaIzhod(SignalUtil.omejitevSignala(izhodnaTurbina, 0, 100));
        zadnjaNapaka = proportional;
        prejsnjeNapake.Add(napaka);
    }
}

```

Slika 24: Regulacija PID pretoka zraka

```

public void izracunajHitrostTurbin(Podatki podatki) {
    cikel++;
    if (cikel > stCiklovMedSprememboJakostiTurbin) {
        cikel = 0;
        double napaka = podatki.getTlakKomora() - setpoint;
        double proportional = 0;

        if (Math.Abs(napaka) > dovoljenaNapaka) {
            proportional = napaka;
        }
        double razlikaVNapaki = proportional - zadnjaNapaka;
        prejsnjeNapake.Add(napaka);

        if (prejsnjeNapake.Count > steviloPrejsnjihNapak) {
            prejsnjeNapake.RemoveAt(0);
        }
        vsotaNapak = prejsnjeNapake.Average();

        double sprememba = Kp * proportional + Ki * vsotaNapak + Kd * razlikaVNapaki;

        sprememba = SignalUtil.omejitevSignala((int)sprememba, 0 - korakVeliki, korakVeliki);

        if ((podatki.getJakostTurbinaIzhod() + (int)sprememba > 100)
            || (podatki.getJakostTurbinaIzhod() + (int)sprememba < 0)) {

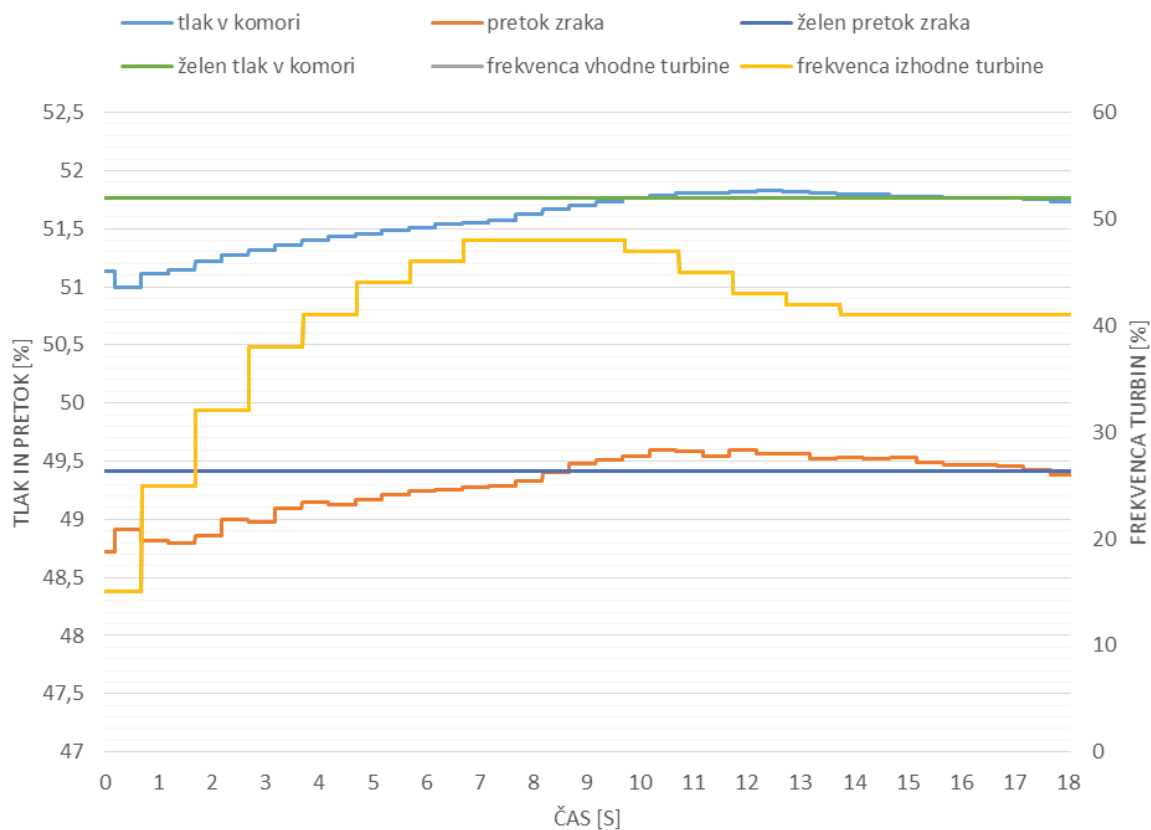
            podatki.setJakostTurbinaVhod(SignalUtil.omejitevSignala(podatki.getJakostTurbinaVhod() + (int)sprememba, 0, 100));
        } else {

            podatki.setJakostTurbinaIzhod(SignalUtil.omejitevSignala(podatki.getJakostTurbinaIzhod() + (int)sprememba, 0, 100));
        }
        zadnjaNapaka = proportional;
        prejsnjeNapake.Add(napaka);
    }
}

```

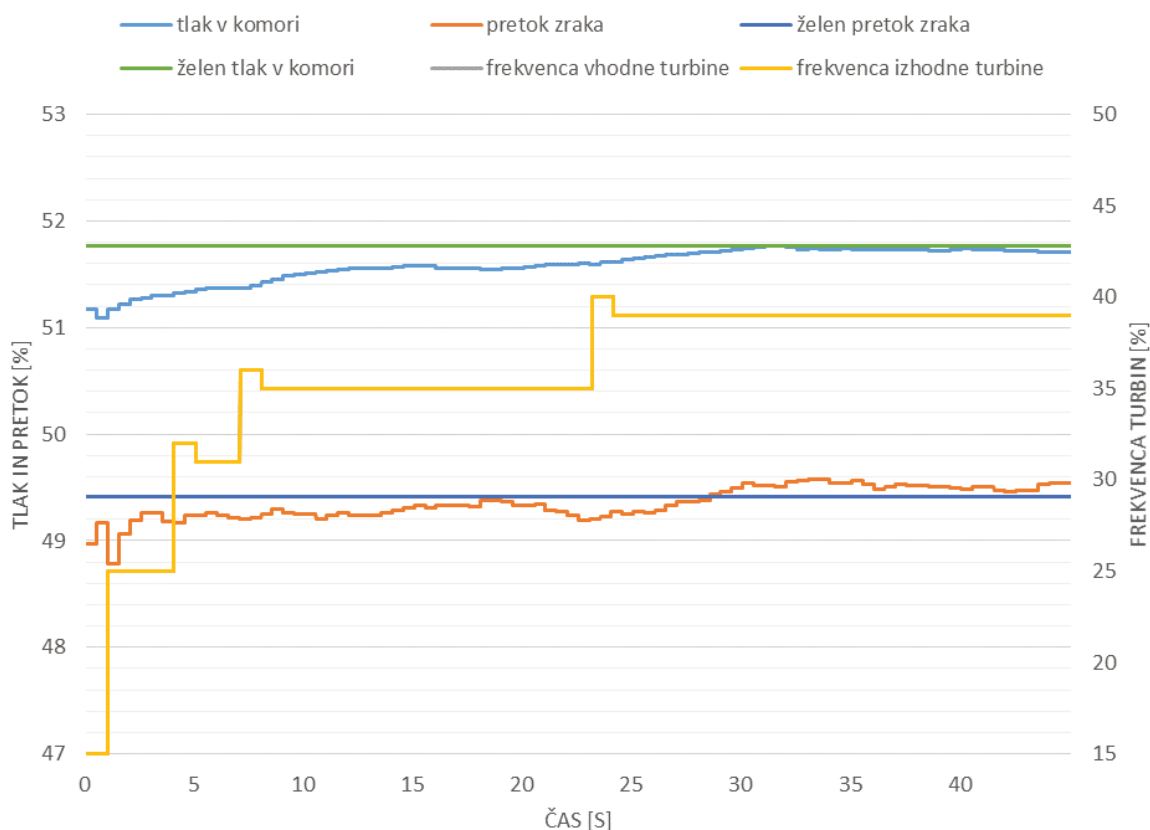
Slika 25: Regulacija PID tlaka v komori

Za lažjo nastavitev parametrov smo najprej krmilili samo pretok zraka, saj je tako lažje ugotoviti vpliv določenih parametrov na spremembo frekvence. Tudi tukaj smo zaradi varnosti in zanesljivosti omejili največjo možno spremembo frekvence. Prav tako smo parametra  $K_I$  in  $K_D$  na začetku postavili na nič, da smo dobili sprejemljiv čas vzpona.  $K_P$  smo postavili na 1, kar pa je bilo občutno prenizko, saj je bil čas vzpona predolg. Tako smo ta parameter postopoma povečevali, dokler nismo dosegli sprejemljivega časa vzpona, nato pa smo začeli spreminjati še parametra  $K_D$  in  $K_I$ , s čimer smo zmanjšali prevzpon in umirili nihanja.



Slika 26: Regulacija PID - prevzpon pretoka zraka

Na sliki 26 je vidno, da ob parametrih  $K_P = 5$ ,  $K_I = 1$  in  $K_D = 2$  pride do prevzpona, saj se pretok preveč poviša, zato se mora tudi zmanjšati frekvenca turbin. S spreminjanjem parametrov smo našli primerno nastavitvev  $K_P = 5$ ,  $K_I = 2$  in  $K_D = 4$  (slika 27). Zvišanje parametra  $K_D$  je odpravilo prevzpon. Pri testiranjih so se ti parametri izkazali za zelo zanesljive, saj se nikoli ni zgodilo, da bi tlak presegel meje in bi prišlo do izpada sistema, kot se je občasno zgodilo pri dvotočkovni regulaciji.



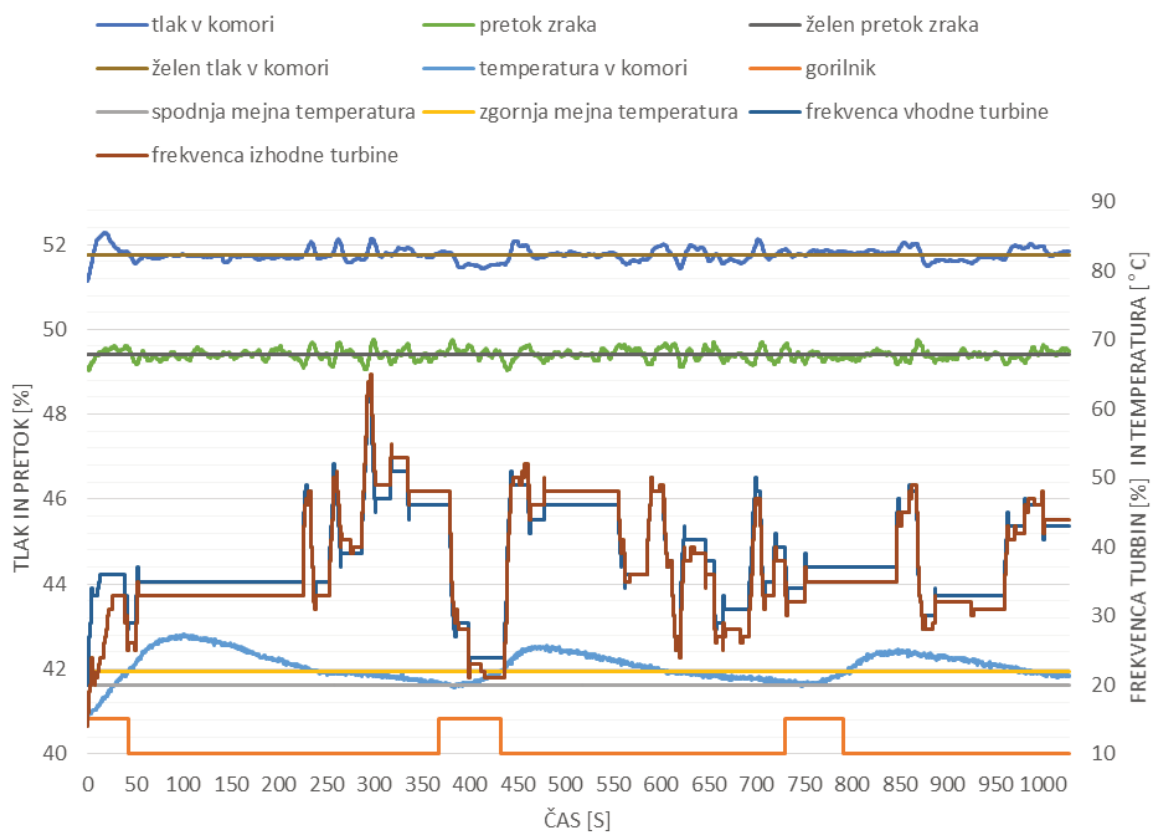
Slika 27: Regulacija PID - parametri  $K_P=5$ ,  $K_I=2$  in  $K_D=4$

### Regulacija PID z vključenim ogrevanjem

Ob vključenem gretju se pretok zraka in tlak v lakirno-sušilni komori dinamično spreminjata s spremembo temperature v komori, zato je večkrat potrebno prilagajati frekvenco turbin. Pri dvotočkovni regulaciji je bilo razvidno, da ima algoritem težave s spremenljivimi razmerami. Čeprav je sistem brez ogrevanja deloval večinoma brez težav, je ob vključenem ogrevanju pogosto prihajalo do prenizkega oziroma previsokega tlaka v komori, saj smo zaradi dveh možnih velikosti spremembe frekvence preveč omejeni, da bi lahko pravočasno in predvsem pravilno prilagodili delovanje turbin. Tako se večkrat zgodi, da z manjšo spremembo frekvence ne uspemo dovolj hitro prilagoditi vrednosti, z večjo spremembo pa jih preveč spremenimo in pride do nihanja, ki ga pogosto algoritem ne uspe umiriti. Algoritem prav tako ni prilagajal vrednosti, če je bilo odstopanje znotraj meja dovoljenega odstopanja, tako da kljub temu, da je tlak oziroma pretok padal ali se dvigoval, algoritem ni spreminjal hitrosti frekvence turbin dokler ni vrednost ušla iz tega območja.

Prav zato je v tem primeru regulacija PID boljša izbira. Kot je razvidno na sliki 28 se razmere najbolj spremenijo po vklopu peči. Vendar pa algoritem PID uspe te spremembe izravnati, saj nastavi pravilno frekvenco turbin. Prav tako lahko pravilneje nastavi velikost spremembe frekvence in zato ne pride do nihanj, ki jih ne bi mogel umiriti. Še zmeraj smo zaradi

varnostnih razlogov sicer ohranili največjo velikost spremembe 4 % maksimalne frekvence turbin, saj je tudi v tem primeru čas do dosežene želene vrednosti dovolj kratek. Vsa testiranja so bila uspešna, saj se niti enkrat ni zgodilo, da bi imeli v komori previsok ali prenizek tlak, zaradi katerega bi prišlo do prekinitve delovanja.



Slika 28: Regulacija PID z vključenim ogrevanjem



## 5. Zaključek

V diplomskem delu je predstavljena izvedba avtomatske regulacije lakirno-sušilne komore. Pri tem z vhodno in izhodno turbino reguliramo pretok in nadtlak v komori. S pomočjo peči reguliramo tudi temperaturo zraka v komori. Glavna razloga za izvedbo projekta sta bila zmanjšanje nihanj tlaka, temperature in pretoka med samim procesom, ter boljši izkoristek energentov in s tem znižanje stroškov obratovanja. Opisana je tudi implementacija dveh različnih načinov regulacije tlaka in pretoka, in sicer dvotočkovne regulacije in regulacije PID.

Ob tem se je izkazalo, da za dan problem dvotočkovna regulacija ni uporabna, saj so se pojavila nihanja, ki jih le ta ni uspela umiriti. Regulator PID se je med testiranjem izkazal za zanesljivejšega. Kljub temu, da je pri tem občasno prišlo do manjših nihanj, se nikdar ni zgodilo, da regulator ne bi uspel umiriti tlaka, tako da ni nikdar prišlo do izpada sistema zaradi prevelikega nadtlaka oziroma do varnostnega izklopa turbin zaradi podtlaka. Prednost je predvsem v tem, da pri tem algoritmu nismo tako omejeni glede velikosti spremembe, saj za razliko od dvotočkovne regulacije, kjer imamo samo dve možni velikosti spremembe, regulator PID lahko spremeni frekvence turbin za poljubno vrednost. Velikost spremembe smo zaradi varnosti omejili na 4 %, saj se je izkazalo, da večjih sprememb ne potrebujemo. Regulator je v zadovoljivem času dosegel delovno območje. Ko je to doseženo, v večini primerov ne potrebujemo večjih sprememb. Hkrati s tem zagotovimo, da ne pride do prevelikega nihanja tlaka v komori ob spremembi pretoka. Kot smo pokazali, enaka sprememba frekvence turbine ne pomeni nujno tudi enake razlike v tlaku, saj pri višjih frekvencah enaka sprememba frekvence povzroči večjo razliko v tlaku kot pri manjših. Dodatno na to vplivajo drugi dejavniki, predvsem zamašenost filtrov. Tako smo videli, da je v nekaterih primerih bila frekvenca obeh turbin enaka, v drugih pa različna, kljub temu, da je bil nadtlak v komori v vseh primerih enak.

Načrtujemo še dodatne funkcije v uporabniškem vmesniku, tako da bo uporabnik imel možnost definirati delovne faze v odvisnosti od velikosti obdelovanca, vrste in količine uporabljenih nanosov ter drugih tehnoloških pogojev. Te faze bodo lahko časovno omejene, ali pa se bodo zaključile ročno, saj na primer v fazi lakiranja težko vnaprej določimo čas. Uporabnik bo imel možnost te vzorce shraniti in jih pri podobni delovni fazi ponovno uporabiti. Prav tako nameravamo posodobiti vmesnik glede na želje uporabnika po obdobju testiranja.



## Literatura

- [1] (2016) B. Zupančič, Avtomatsko vodenje sistemov. Ljubljana: Fakulteta za elektrotehniko. Dostopno na: [http://studentski.net/get/ulj\\_el1\\_avs\\_sno\\_avtomatsko\\_vodenje\\_sistemov\\_\\_ucbenik\\_01.pdf](http://studentski.net/get/ulj_el1_avs_sno_avtomatsko_vodenje_sistemov__ucbenik_01.pdf)
- [2] (2010) Technical Guidelines for Paint Spray Booths. Dostopno na: [https://www.dm.gov.ae/wps/wcm/connect/24fc250046ccfe1a97e4ff2ffb3a7d38/DM-PH%26SD-P4-TG07-\(Technical+Guidelines+for+Paint+Spray+Booths\).pdf?MOD=AJPERES](https://www.dm.gov.ae/wps/wcm/connect/24fc250046ccfe1a97e4ff2ffb3a7d38/DM-PH%26SD-P4-TG07-(Technical+Guidelines+for+Paint+Spray+Booths).pdf?MOD=AJPERES)
- [3] (2009) OSHA United States Department of Labor- Occupational Safety & Health Administration, člen 1910.94(c)(6)(i). Dostopno na: [https://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show\\_document?p\\_table=STANDARDS&p\\_id=9734#1910.94\(c\)\(6\)\(i\)](https://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=9734#1910.94(c)(6)(i))
- [4] (2011) Paint booth temperature control system. Dostopno na: <http://www.google.com/patents/US6502629>
- [5] (1994) Uredba o emisiji snovi v zrak iz lakirnic. Dostopno na: <https://www.uradni-list.si/1/content?id=70694>
- [6] (2005) Uredba o mejnih vrednostih emisije hlapnih organskih spojin v zrak iz naprav, v katerih se uporabljajo organska topila. Dostopno na: <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED3659>
- [7] (2004) Zakon o varstvu okolja – ZVO-1. Dostopno na: <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO1545>
- [8] J. Domnick, A. Scheibe, Q. Ye, Berechnung der Luftströmung in Lackierkabinen mit numerischen Verfahren, Automobil-Tagung, Weimar: 1998.
- [9] T. Brock, M. Groteklaes, P. Mischke, Lehrbuch der Lacktechnologie, 2. Auflage, Vincenz: Hanover, 1998.
- [10] S. Šmigoc, Klimatske naprave in njihova avtomatizacija, Maribor: FERI, 2008.
- [11] D. Smoljan, Upravljanje termotehničkim sustavima, Zagreb: FSB, 2015.
- [12] (2003) USB Experiment Interface Board K8055. Dostopno na: [http://www.velleman.eu/downloads/0/illustrated/illustrated\\_assembly\\_manual\\_k8055n-uk.pdf](http://www.velleman.eu/downloads/0/illustrated/illustrated_assembly_manual_k8055n-uk.pdf)
- [13] K8055D Tehnical guide. Dostopno na: <https://www.esr.co.uk/manuals/k8055N.pdf>
- [14] (2005) Universeller temperatursensor, tehcnical guide. Dostopno na: [http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/175000-199999/191055-an-01-ml-Temperatursensor\\_de\\_en\\_fr\\_nl\\_es.pdf](http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/175000-199999/191055-an-01-ml-Temperatursensor_de_en_fr_nl_es.pdf)
- [15] (2012) Differential Air Pressure Sensor, Product Features. Dostopno na: [http://www.phidgets.com/products.php?product\\_id=1136](http://www.phidgets.com/products.php?product_id=1136)
- [16] (2013) Phidgets. Dostopno na: [http://www.phidgets.com/wiki/index.php?title=1136\\_User\\_Guide&pr](http://www.phidgets.com/wiki/index.php?title=1136_User_Guide&pr)

- [17] Hitachi L100 Series Inverter Instruction Manual. Dostopno na: <http://www.hitachi-america.us/supportingdocs/forbus/inverters/UserManuals/hitachi-l100-series-inverter-service-manual.pdf>
- [18] Hitachi L100 Series Manual. Dostopno na: <https://www.automationdirect.com/static/manuals/l100/l100.pdf> Hitachi-L100-Series-VFD-Manual.pdf